



Étude statistique et comparative de modèles conceptuels hydrologiques pour des bassins versants de la province du Québec, Canada

Mustapha Hamaoui

Maîtrise en ingénierie

Supervisée par

Romain Chesnaux

Hassan Ezzaidi

Québec, Canada

© Mustapha Hamaoui, 2019

‘With hard work there is no limit to what you can achieve’

Cornelia Stoeckli

RÉSUMÉ

La description des processus de transformation des précipitations (pluie et neige) en débit dans un bassin versant passe par le choix d'un modèle hydrologique adéquat. Les modèles hydrologiques conceptuels servent à prédire les débits dans les rivières à l'aide de plusieurs paramètres, qui n'ont pas toujours une signification physique. Les débits doivent être déterminés par calibration. Le choix d'une tel modèle repose sur son efficacité, c'est-à-dire sa capacité à fournir des jeux de paramètres permettant au modèle de donner des simulations satisfaisantes. (Perrin, 2002)

La validation est l'étape qui suit la calibration où on s'assure que le modèle peut faire des prédictions exactes et reproductibles en dehors de la période sur laquelle il a été calibré (Vogel, 2003). La méthode la plus courante pour valider un modèle hydrologique sur un bassin versant est d'ajuster les données simulées avec les mesures de terrain. La structure de modèle et leurs paramètres associés ne sont pas uniques. Il peut exister plusieurs représentations mathématiques, ce qui risque d'influencer la précision des résultats fournis par le modèle. Dans la plupart des applications de modèles hydrologiques, les réponses simulées du bassin versant, autres que le débit, restent internes (des variables d'état) au modèle. Ceci peut rendre discutable la validité de la description du modèle au processus interne du bassin versant.

Il existe plusieurs méthodes pour valider un modèle hydrologique (Seibert, 1997) mais il n'existe pas encore de méthode ou de critère quantitatif définitif pour rejeter un modèle de bassin versant (Vogel & Sankarasubramanian, 2003). La méthode de covariance-variance proposée par Vogel offre une méthodologie quantitative pour accepter ou rejeter un modèle de bassin versant.

L'objectif de cette étude est de s'assurer de la capacité du modèle à décrire les échanges dans un bassin versant. La méthode de covariance-variance est basée sur l'aptitude du modèle à représenter la covariance des données météorologiques avec les données de sortie (débit) sans passer par l'étape de calibration. La calibration du modèle génère une erreur inévitable (Vogel & Sankarasubramanian, 2003).

Afin de vérifier la pertinence de la méthode de la covariance et sa fiabilité, nous l'avons appliquée sur 125 bassins hydrographiques québécois jaugés par le département de l'expertise hydraulique du Québec (DEHQ), en nous servant des modèles hydrologiques GR4J (Perrin, Michel, & Andréassian, Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation, 2003) à quatre paramètres, qui est couplé avec le module de neige CemaNeige (Valery, 2010), HBV (Lindstrom, Johansson, Persson, Gardelin, & Bergstrom, 1997) à dix paramètres, MOHYSE (Fortin & Turcotte, 2007) à dix paramètres et HMETs (Martel, Demeester, & Brissette, HMETs- A simple and efficient model for flow forecasting, climate studies and teaching hydrological modelling, 2014) à vingt et un paramètres. Pour chaque bassin, une période de 16 ans située entre 1980 et 2015 a été sélectionnée.

La démarche consiste à effectuer un grand nombre de simulations (Monte Carlo) et s'appuie sur les données observées disponibles (débits, précipitations, température...) afin d'explorer exhaustivement l'espace des valeurs acceptables de débits obtenues par les quatre modèles.

Le but est de réussir à tirer l'information des données disponibles pour un bassin et d'en déduire la structure du modèle la plus adaptée. Nos résultats montrent que les modèles GR4J et HMETs ont pu établir une relation entre un ensemble de données simulées obtenues par la méthode de Monte-Carlo et l'observation pour tous les bassins, alors que les modèles hydrologiques MOHYSE et HBV n'ont pas pu établir cette relation pour la majorité des bassins versants étudiés. Ces deux derniers modèles ont représenté les bassins versants moins bien que les autres modèles.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES.....	xi
REMERCIEMENTS	xii
INTRODUCTION	1
Chapitre 1 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	4
1.1 Mise en contexte et problématique.....	4
1.2 Objectifs et hypothèses.....	5
1.3 Hypothèses.....	7
1.4 Plan du mémoire	7
Chapitre 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	8
2.1 Modélisation hydrologique	8
2.1.1 La structure des modèles hydrologiques	8
2.1.2 Les modèles hydrologiques conceptuels.....	10
2.1.3 Les modèles hydrologiques à base physique	10
2.2 Calibration et degré de correspondance.....	12
2.2.1 Calibration d'un modèle hydrologique	13
15	
2.2.2 Degré de correspondance et optimisation des paramètres	15
2.3 Validation, équi-finalité et incertitudes structurelles	16
2.3.1 La validation d'un modèle hydrologique.....	17
2.3.2 Équi-finalité et incertitudes	17
Chapitre 3 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.....	19
3.1 Description des données utilisées.....	22
3.1.1 Données hydrométriques.....	22
3.1.2 Données météorologiques	22
3.2 Méthode de Monte Carlo.....	23
3.3 Modèles hydrologiques.....	24
3.3.1 Le modèle hydrologique GR4J.....	24
3.3.2 Le modèle hydrologique HBV	26
3.3.3 Le modèle hydrologique MOHYSE.....	27
3.3.4 Le modèle hydrologique HMETS	28

3.4	Méthode de la covariance.....	29
3.4.1	Covariance et corrélation	30
3.4.2	Autocorrélation	31
3.4.3	Corrélation croisée	32
Chapitre 4	ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	33
4.1	Les résultats par modèle hydrologique.....	34
4.1.1	Modèle hydrologique GR4J	36
4.1.2	Modèle hydrologique HBV	42
4.1.3	Modèle hydrologique MOHYSE.....	46
4.1.4	Modèle hydrologique HMETS	50
4.2	Bassins versants validés par les quatre Modèles	54
4.3	Bassins versants ne pouvant pas être modélisés	59
	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	62
	LISTE DES RÉFÉRENCES.....	64
	Annexe A : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES QUATRE MODÈLES HYDROLOGIQUES UTILISÉS.....	68
	Annexe B : LISTE DES BASSINS VERSANTS.....	72
	Annexe C : LISTE DES BASSINS VERSANTS VALIDÉS PAR GR4J	75
	Annexe D : LISTE DES BASSINS VERSANTS VALIDÉS PAR HBV	77
	Annexe E : LISTE DES BASSINS VERSANTS VALIDÉS PAR HMETS	78
	Annexe F : LISTE DES BASSINS VERSANTS VALIDÉS PAR MOHYSE	81
	Annexe G : LES RESULTATS DE L'APPLICATION DE LA METHODE DE COVARIANCE SUR LE MODÈLE GR4J.....	82
	Annexe H : LES RESULTATS DE L'APPLICATION DE LA METHODE DE COVARIANCE SUR LE MODÈLE HBV.....	98
	Annexe I : LES RESULTATS DE L'APPLICATION DE LA METHODE DE COVARIANCE SUR LE MODÈLE MOHYSE	116
	Annexe J : LES RESULTATS DE L'APPLICATION DE LA METHODE DE COVARIANCE SUR LE MODÈLE HMETS	136

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 : Paramètres de GR4J et CemaNeige	25
Tableau 3-2 : Paramètres du Modèle HBV	27
Tableau 3-3 : Paramètres du Modèle MOHYSE.....	28
Tableau 3-4 : Paramètres du modèle HMETS.....	29
Tableau 4-1 : Caractéristiques physiques des bassins versants adaptées au modèle GR4J	41
Tableau 4-2 : Caractéristiques physiques des bassins versants adaptée au modèle HBV	46
Tableau 4-3 : Caractéristiques physique des bassins versants adaptés au modèle MOHYSE.....	50
Tableau 4-4 : Caractéristiques physiques des bassins versants adaptée au modèle HMETS	54
Tableau 4-5 : Liste des bassins versants adaptés aux quatre modèles	56
Tableau 4-6 : Liste des bassins versants rejetés par les quatre modèles	60

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Les étapes proposées pour la validation d'un modèle hydrologique	6
Figure 2-1 : La méthode d'ajustement des paramètres d'un modèle hydrologique	13
Figure 2-2 : Les différentes étapes d'ajustement des paramètres d'un modèle hydrologique	15
Figure 3-1 : Carte de localisation des bassins versants étudiés dans la province du Québec (Réalisé avec ArcGis)20	
Figure 4-1 : Valeurs de l'autocorrélation du débit observé de la sortie ρ_Q et la corrélation croisée observée ρ_Q, P , pour le modèle GR4J appliqué au bassin versant aux saumons	36
Figure 4-2 : Bassins versants adéquats avec la structure du modèle hydrologique GR4J (Réalisé avec ArcGis)	37
Figure 4-4 : Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1ère graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, ρ_Q, P et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2ème graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit ρ_Q, Ep et l'autocorrélation du débit ρ_Q , dans le cas de quatre bassins versants adaptés au modèle GR4J.....	39
Figure 4-5 : Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1ère graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, ρ_Q, P et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2ème graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit ρ_Q, Ep et l'autocorrélation du débit ρ_Q , dans le cas de quatre bassins versants rejetés par le modèle GR4J	40
Figure 4-6 : Bassins versants adéquats avec la structure du modèle hydrologique HBV	42
Figure 4-7 Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1ère graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, ρ_Q, P et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2ème graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit ρ_Q, Ep et l'autocorrélation du débit ρ_Q , dans le cas de quatre bassins versants adaptée au modèle HBV	44
Figure 4-8 : Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1ère graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, ρ_Q, P et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2ème graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit ρ_Q, Ep et l'autocorrélation du débit ρ_Q , dans le cas de quatre bassins versants rejetés par le modèle HBV	45

Figure 4-9 : Bassins versants adéquats avec la structure du modèle hydrologique MOHYSE (Réalisé avec ArcGis)	47
Figure 4-10 : Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1ère graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, $\rho_{Q,P}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2ème graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit $\rho_{Q,Ep}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q , dans le cas de quatre bassins versants validés par le modèle MOHYSE	48
Figure 4-11 Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1ère graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, $\rho_{Q,P}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2ème graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit $\rho_{Q,Ep}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q , dans le cas de quatre bassins versants rejetés par le modèle MOHYSE	49
Figure 4-12 : Bassins versants adéquats avec la structure du modèle hydrologique HMETS (Réalisé avec ArcGis)	51
Figure 4-13 : Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1ère graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, $\rho_{Q,P}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2ème graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit $\rho_{Q,Ep}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q , dans le cas de quatre bassins versants adaptés au modèle HMETS	52
Figure 4-14 Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1ère graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, $\rho_{Q,P}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2ème graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit $\rho_{Q,Ep}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q , dans le cas de quatre bassins versants rejetés par le modèle HMETS	53
Figure 4-15 : les Bassins versants adéquat avec la structure du quatre modèles et les bassins versants qui ne marche avec aucun modèle (Réalisé avec ArcGis)	55
Figure 4-16 : Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1ère graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, $\rho_{Q,P}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2ème graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit $\rho_{Q,Ep}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q , le cas du bassin versant aux pommes pour les quatre modèles	57

Figure 4-17 : Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1ère graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, $\rho_{Q,P}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2ème graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit $\rho_{Q,Ep}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q , le cas du bassin versant De la roche pour les quatre modèles..... 59

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

MELCC : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques

CEHQ : Centre d'expertise hydrique du Québec

BV : Bassin Versant

MH : Milieux Humides

GR4J : Modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journaliers

HBV : Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning model

MOHYSE : Modèle hydrologique simplifié à l'extrême

HMETS : Hydrology Model-École de Technologie Supérieure

UNESCO : Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture

REMERCIEMENTS

Je témoigne toute ma reconnaissance et mes remerciements les plus profonds à mon directeur de recherche Monsieur Romain Chesnaux, professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi, pour avoir accepté de diriger ce travail. Je lui suis reconnaissant de la confiance et du soutien qu'il m'a témoigné.

Mes remerciements s'adressent également à mon codirecteur Monsieur Hassan Ezzaidi, professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi, qui a dirigé ce travail avec bienveillance, pour son écoute et sa disponibilité et pour ses précieux conseils qui m'ont été d'une aide précieuse durant l'élaboration de ce travail. Qu'il reçoive le témoignage de mon profond respect pour les qualités humaines qu'il a montrées.

Je remercie également les membres de l'équipe du groupe de recherche R2eau de l'UQAC, pour leur aide, leur disponibilité et leur professionnalisme.

Également, je tiens à formuler ma profonde gratitude à l'ensemble des collègues pour leur aide, amabilité et serviabilité, et pour l'ambiance familiale que nous avons vécue ensemble.

Je me fais un devoir de témoigner ma reconnaissance et mon respect à mes amis et ma famille, particulièrement à mon cher père et à ma chère mère, pour leur soutien et leur aide ainsi que leur amour inconditionnel.

INTRODUCTION

Les humains se préoccupent de la gestion de l'eau (des canaux, des digues, des barrages et des conduites d'eau) au moins depuis les premières civilisations développées le long des rives des rivières, il y a plus de 8 000 ans. Depuis les années 1980, la demande mondiale en eau augmente annuellement de 1% (Connor, Uhlenbrook, & Koncagul, 2019). Cette augmentation continuera à un rythme similaire sous l'influence de la croissance économique et démographique jusqu'en 2050.

Au Québec, l'eau est une richesse et une fierté collective. En raison de son abondance, elle joue un rôle clé dans la croissance démographique et économique des régions du Québec.

Les ressources hydriques au Québec sont énormes, estimée à 3% des réserves mondiales d'eaux douces renouvelables se composent de quelques 500,000 lacs et 4,500 rivières qui constituent 22% du territoire de la province et qui sont répartis dans 13 régions hydrographiques regroupant 430 bassins versants majeurs; dont 100 bassins versants ayant une superficie de drainage supérieure à 3,500 km². L'hydrologie aide à exploiter et à préserver les ressources de ces multiples réseaux aquatiques de façon efficace.

L'hydrologie est la science qui traite les phénomènes naturels qui déterminent l'occurrence, la présence et la distribution des eaux superficielles et souterraines de la Terre et de leurs propriétés chimiques, biologiques et physiques ainsi que de leur interaction avec l'environnement physique, dans le temps et dans l'espace (UNESCO, 2012). L'hydrologie fournit la connaissance et les outils nécessaires pour une représentation des phénomènes qui accompagnent et causent les mouvements de l'eau sur terre. Afin de répondre aux besoins humains liés aux ressources en eau, les hydrologues utilisent des représentations simplifiées du processus hydrologique pour décrire la relation pluie-débit au sein d'un bassin versant. Ce concept est nommé la modélisation hydrologique.

La modélisation hydrologique implique des processus hautement non linéaires, des interactions complexes et une variabilité spatiale élevée à l'échelle du bassin. L'objectif fondamental de la modélisation hydrologique est de comprendre le système hydrologique afin de fournir des informations fiables pour la gestion durable des ressources en eau.

Au cours de l'histoire du développement des modèles, plusieurs sortes de modèles hydrologiques ont été adoptés, modifiés et appliqués en fonction des données disponibles et de la finalité de la modélisation pour résoudre des problèmes hydrologiques comme prévoir les débits des cours d'eau, les niveaux d'eau souterraine ou la qualité de l'eau et beaucoup d'autres informations. Ces modèles apportent des réponses à des questions et résolvent des problèmes pratiques, tels que la prévision des inondations, de la sécheresse, de l'érosion, du transport de sédiments, de la pollution de l'eau et de la conception des infrastructures.

Pour accompagner cette transformation, la structure des modèles hydrologiques est devenue de plus en plus sophistiquée et complexe. Les modèles ont évolué de globaux et conceptuels à distribués et à base physique, nécessitant une vaste augmentation à la fois des données d'entrée et de la caractérisation des paramètres du modèle. Les algorithmes de résolution numérique sont aussi passés d'une résolution grossière dans le temps et l'espace à une résolution beaucoup plus fine. Ce qui a rendu la calibration des paramètres et la validation de ces modèles plus délicate.

Ces modèles hydrologiques ne sont que des interprétations de la réalité pour décrire les différentes étapes du cycle de l'eau telles que les précipitations, l'évapotranspiration, les infiltrations, l'interception, la fonte des neiges, les écoulements en surface, les écoulements souterrains ainsi que leurs interactions. Grâce à leurs paramètres libres, ils produisent des prévisions qui imitent raisonnablement le comportement des variables observées d'une situation particulière.

Malgré le progrès révolutionnaire en informatique, les technologies de mesures (les capteurs à distance, les systèmes d'information géographique, une immense puissance de calcul des ordinateurs...), les méthodes d'analyse des données, les approches de modélisation hydrologique et dans beaucoup d'autres domaines appliqués à l'hydrologie, notre compréhension du cycle hydrologique et des processus et problèmes associés est encore loin d'être complète.

Ce progrès a apporté encore plus de défis et d'énigmes à résoudre. Celles-ci incluent les prévisions dans des bassins versants non jaugés, l'évaluation des impacts des changements climatiques sur nos ressources en eau, les liens entre données hydrologiques et les phénomènes physiques dans les bassins versants, l'interprétation de nos modèles mathématiques et de nos méthodes pour une meilleure compréhension des systèmes et processus hydrologiques.

L'estimation des incertitudes devrait aussi faire partie intégrante de toute étude de modélisation hydrologique, en raison de la représentation simplifiée et imparfaite du fonctionnement des bassins versants par les modèles hydrologiques; ces modèles n'arrivant pas à représenter convenablement le processus hydrologique dans les bassins versants dotés de caractéristiques uniques et difficiles à mesurer.

Les incertitudes associées à la structure inadéquate du modèle peuvent devenir plus grandes, plus importantes que les incertitudes liées aux données utilisées, ces erreurs liées à la structure du modèle hydrologique (fonction objective) (Yapo, Gupta, & Sorooshien, 1983) peuvent donc limiter la performance du modèle.

Chapitre 1

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

Les avancées dans plusieurs aspects de l'hydrologie ont permis de développer des modèles susceptibles de reproduire de mieux en mieux les différents processus hydrologiques responsables de l'évolution des quantités des eaux à l'échelle du bassin versant, de faire avancer la compréhension du fonctionnement du cycle de l'eau et de prédire les différents scénarios du comportement d'un bassin versant en fonction des futures sollicitations.

Les modèles hydrologiques sont basés souvent sur une combinaison de modules décrivant les différentes étapes composant le cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant à l'aide de bilan de masse, de quantité de mouvement et d'énergie thermique. Ils offrent une multitude de modélisations possibles. Ils sont diversifiés en fonction de la diversité et de la complexité des processus à décrire, de la disponibilité des données et de l'objectif de l'application du modèle.

1.1 Mise en contexte et problématique

Les bassins versants sont des systèmes complexes qui peuvent impliquer plusieurs milieux de travail avec différentes propriétés variables dans le temps. Les hydrologues utilisent des approches diversifiées pour décrire ces milieux, ce qui a mené à une panoplie de modèles hydrologiques avec différents modules et structures.

En raison de cette variété de modèles, le choix d'un modèle plutôt qu'un autre n'est pas une tâche facile. Face à ce défi, une méthode d'identification de la structure de modèles les plus efficaces à décrire des échanges dans un bassin versant particulier permettrait la réalisation du choix d'un modèle hydrologique adapté.

Privilégier un modèle hydrologique doit être basé non seulement sur sa capacité à représenter le fonctionnement observé du bassin versant (souvent des mesures de débit à

l'exutoire du bassin) mais aussi sur la capacité du modèle à réaliser une représentation convenable des processus hydrologiques. La calibration des paramètres du modèle peut dissimuler des erreurs de représentation des phénomènes hydrologiques (Zehe & Sivapalan, 2007) intervenant dans un bassin versant.

Des valeurs simulées semblables à l'observation ne garantissent pas que le modèle représente adéquatement l'hydrologie d'un bassin versant. Ceci nous ramène à l'importance de valider au préalable la structure du modèle et ce indépendamment de l'étape de la calibration qui sert à estimer les paramètres. Une telle approche permettra d'éviter l'introduction de l'erreur due à l'étape de calibration du modèle.

La calibration se concentre sur la qualité de l'ajustement entre les valeurs simulées obtenues par l'ensemble des équations qui forment la structure d'un modèle hydrologique et les observations à travers la sélection d'un jeu de paramètres.

Cependant, la validation du degré de concordance entre les valeurs simulées obtenues par le modèle et les observations après la calibration n'est pas suffisant pour évaluer la performance du modèle. Les modèles hydrologiques basés sur les théories actuelles reposent sur la calibration pour compenser le manque de compréhension des processus réels et de leurs interactions.

L'élaboration de nouvelles méthodes pour évaluer un modèle séparément de l'étape de calibration constituera un défi scientifique pour confirmer les hypothèses qui forment un modèle hydrologique avant que le modèle soit ajusté aux données (calibrées).

1.2 Objectifs et hypothèses

Un des défis soulevés par l'hydrologie est de trouver la structure de modèle adéquate pour décrire les échanges sur un bassin versant. L'estimation des paramètres d'un modèle est associée à différentes sources d'incertitudes (incertitude liée à la représentation simplifiée des mécanismes hydrologiques, incertitude sur les données...).

Dans le but de fournir des outils robustes à la validation d'un modèle hydrologique indépendamment de l'étape de la calibration, cette étude vérifie la capacité de quatre modèles hydrologiques (GR4J, HBV, MOHYSE, HMETs) à décrire les échanges dans un bassin versant en utilisant une méthode d'identification des structures des modèles susceptibles de reproduire les différents processus hydrologiques dans un bassin versant particulier. La figure 1-1 décrit les différentes étapes utilisées correspondant aux objectifs à atteindre de cette présente étude.

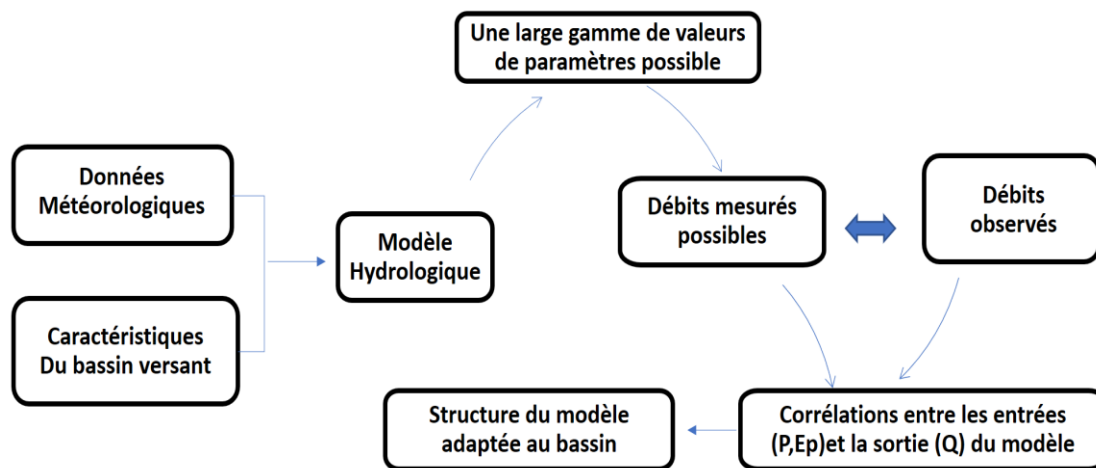


Figure 1-1 : Les étapes proposées pour la validation d'un modèle hydrologique

Des plages de valeurs de paramètres ont été générées à l'aide de nombres aléatoires à partir d'une distribution uniforme. Pour chaque jeu de paramètres, des séries de valeurs de débit ont été simulées sur la base des données d'entrée du modèle (précipitations et évapotranspiration). Pour chacune de ces séries de débit simulé, un ensemble de covariances (entre les données d'entrée et le débit simulé) a été calculé. La covariance entre les données d'entrées du modèle et les données de sortie permet de connaître si la structure du modèle est capable de décrire les échanges dans un bassin hydrologique.

1.3 Hypothèses

1. La méthode de la variance-covariance utilisée par Vogel (Vogel & Sankarasubramanian, 2003) est applicable au Québec et pour des modèles de complexité variable pour la validation de la structure de modèles adéquats à un bassin versant donné.
2. Le modèle le plus complexe (plus de paramètres) offre plus de flexibilité et sera applicable de manière plus générale.

1.4 Plan du mémoire

Dans le présent mémoire, l'intérêt de l'étude sera porté sur l'application de la méthode variance-covariance pour la validation de quatre modèles hydrologiques (GR4J, HBV, MOHYSE, HMETs). Le travail sera présenté sur cinq chapitres de manière à comprendre l'ensemble des étapes qui ont été réalisées pour mener à bien cette étude. Le premier chapitre présente la problématique et les objectifs de cette recherche. Dans le deuxième chapitre, une revue de la littérature montrant les différentes catégories de modèles hydrologiques et les étapes de calibration et de validation est présentée. L'approche méthodologique est détaillée au chapitre quatre avec une présentation de la méthode de la variance-covariance et les modèles hydrologiques utilisés. Les résultats et les discussions forment le dernier chapitre. Une conclusion clôt le mémoire et présente les perspectives.

Chapitre 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Les hydrologues utilisent des représentations mathématiques de divers processus du cycle de l'eau pour reconstruire des événements passés ou prévoir des événements futurs. Ils s'intéressent plus au fonctionnement du cycle de l'eau et au débit à l'exutoire qu'à la nature, aux interactions et aux composantes des différentes étapes du cycle de l'eau. Une meilleure estimation de la réponse et du comportement d'un bassin versant consiste à tenter de saisir les processus hydrologiques dominants du bassin versant et à tirer le maximum d'informations des données disponibles pour aider à limiter les incertitudes.

2.1 Modélisation hydrologique

La nature et la complexité des processus hydrologiques conduisent à un large nombre de modèles hydrologiques (Singh, 1995) dont les représentations sont différentes. Le choix d'un modèle hydrologique repose sur sa capacité à représenter des processus hydrologiques sa capacité à les décrire spatialement au sein du bassin versant.

2.1.1 La structure des modèles hydrologiques

Quel que soit le type de représentation utilisée, les modèles sont généralement composés de différents modules souvent indépendants. Chaque module est conçu pour prendre en considération les principaux processus du cycle hydrologique, comme les précipitations, l'évaporation, l'infiltration, l'écoulement superficiel, l'écoulement hypodermique et l'écoulement de base, ainsi que le volume d'eau transitant dans la rivière à chaque pas de temps et sur chaque élément du bassin versant.

Selon le modèle hydrologique, certains modules sont interconnectés, de manière à ce que la sortie d'un module soit connectée à l'entrée d'un autre module. Les modules relatifs aux précipitations traitent les processus principalement verticaux (l'évapotranspiration, l'infiltration et la percolation), tandis que les modules relatifs à la relation pluie-ruissellement traitent les processus à prédominance horizontale (écoulement de surface et hypodermique).

Le premier module est souvent utilisé pour préparer les données hydrométriques et météorologiques nécessaires aux modules de simulation disponibles avec la résolution spatiale et temporelle requise. Ce module est souvent accompagné par un module de fonte des neiges qui traite des phénomènes liés à la présence des précipitations solides.

Suit un deuxième module portant généralement sur les échanges des flux sol-végétation-atmosphère. Celui-ci peut inclure l'évaporation et la transpiration des plantes, l'infiltration, le stockage dans les dépressions, l'interception. Il peut être associé aux précipitations contribuant au ruissellement. L'infiltration dans la nappe phréatique est décrite aussi par un module avant d'entrer dans le réseau hydrographique par le débit de base. Un module de routage peut être utilisé pour le débit le long d'une rivière et à travers des lacs, les réservoirs artificiels et les ouvrages hydrauliques. Les variables de sortie du modèle requises peuvent également influencer grandement la structure de celui-ci.

Dans la littérature, on distingue plusieurs sortes de modèles hydrologiques pour décrire la relation pluie-débit. Une subdivision en trois groupes de modèles hydrologiques a été proposée (Perrin, Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative, 2000) (Singh & Frevert, 2001) : les modèles hydrologiques empiriques, les modèles hydrologiques conceptuels et les modèles hydrologiques à base physique. Ces trois types de modèles diffèrent en fonction de l'approche et des équations utilisées.

Les modèles empiriques se comportent comme des boîtes noires (Clarke, 1973). Ils représentent le comportement global d'un bassin versant par une relation mathématique entre

les variables d'entrée et de sortie d'un bassin. Ils traitent des séries de données à partir d'une approche déterministe sans vraiment décrire la nature physique du processus réel; souvent leurs paramètres n'ont pas de signification physique.

Leur légitimité vient de leur efficacité et de leur robustesse pour des applications opérationnelles en ingénierie hydrologique. Ils sont simples à mettre en œuvre et convenables dans les cas où peu de données sont disponibles (Klemeš, 1982). Ils s'appuient sur des théories peu adaptées (systèmes linéaires) et n'aident pas à comprendre le comportement interne d'un bassin, d'où leur rare utilisation pour la recherche.

2.1.2 Les modèles hydrologiques conceptuels

Les modèles conceptuels constituent une représentation simplifiée qui ne correspond pas souvent à la réalité physique. Ils considèrent les bassins versants comme un assemblage de plusieurs réservoirs connectés. Les changements au cours du temps dans les niveaux des réservoirs sont dus aux interactions entre les réservoirs (flux échangés) et l'atmosphère (évapotranspiration, précipitations), ce qui permet de connaître le flux sortant (débit à l'exutoire du bassin). Ils tentent de reproduire les processus de base tels que l'interception, l'infiltration, l'évaporation et le ruissellement en surface. Ils nécessitent une calibration sur des débits mesurés pour pouvoir imiter le comportement hydrologique. Leurs paramètres peuvent avoir une interprétation conceptuelle mais bien souvent ces paramètres ne sont pas mesurables n'ont pas de signification physique. Les modèles conceptuels sont utilisés pour des prévisions de crue (Ambroise, 1998).

2.1.3 Les modèles hydrologiques à base physique

Les modèles hydrologiques à base physique sont apparus dans les années 1980; ils s'appuient sur une description fine de l'ensemble du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant. Ils reposent sur des lois physiques, telles que les équations de Saint-Venant pour l'écoulement de surface dans les cours d'eau, la loi de Darcy pour l'écoulement souterrain saturé

et l'équation de Richards ou Boussinesq pour l'écoulement souterrain en milieu non saturé. Ils sont caractérisés par des paramètres mesurables qui décrivent en principe les propriétés physiques du milieu.

D'un point de vue pratique, plusieurs contraintes limitent leur utilisation à l'échelle d'un bassin versant, comme leur temps de calcul très important, la disponibilité, le nombre et la qualité des données requises (Beven K. , 1989) et le grand nombre de paramètres nécessaires (Payraudeau, 2002). Ces contraintes les rendent de tels modèles à base physique complexes et lourds à exploiter pour les bassins versants de grande taille. Ces modèles sont utilisés davantage pour des objectifs de recherche afin de comprendre les phénomènes hydrologiques simulés et les variables internes mises en jeu.

Le choix de la discrétisation spatiale est également lié aux objectifs pour lesquels le modèle a été développé. Les modèles globaux considèrent le bassin versant comme une entité hydrologique unique. Ils ne prennent pas en compte l'hétérogénéité du milieu physique ni la variabilité spatiale des intrants et des processus hydrologiques. Ils sont très largement utilisés en hydrologie opérationnelle. Ils offrent de nombreux avantages. Ils sont généralement très faciles à développer et à mettre en œuvre. Ils nécessitent très peu de données et incluent très peu de paramètres.

Contrairement aux modèles conceptuels globaux, les modèles conceptuels distribués permettent de simuler les variables hydrologiques d'intérêt. Ils le font en tout point de la discrétisation spatiale du système et en particulier en tout point du réseau hydrographique décrit par le modèle. Ils subdivisent le bassin versant en zones considérées homogènes, qui coulent les unes dans les autres. Le principal inconvénient des modèles spatialisés réside dans la grande quantité d'informations nécessaire pour décrire le bassin versant. Une autre difficulté réside dans la discrétisation des bassins versants qui reste une tâche délicate.

Les modèles peuvent également être événementiels ou continus, dépendant des objectifs de la modélisation. Dans des situations où on cherche à décrire un événement

météorologique donné, sans prendre en considération tout le processus hydrologique, les modèles événementiels sont généralement suffisants, contrairement aux modèles continus intégraux. Les modèles continus (Boughton & Droop, 2003) peuvent être utilisés pour simuler l'évolution des variables d'état sur plusieurs années hydrologiques. La principale différence par rapport aux modèles événementiels réside dans le fait que certains processus pouvant être négligés pendant un événement ne peuvent pas être négligés dans une simulation continue car ils deviennent prédominants entre les événements. L'utilisation de modèles de simulation continue se développe rapidement (Boughton et Droop, 2003).

2.2 Calibration et degré de correspondance

Pour simuler le comportement d'un système hydrologique, les modèles hydrologiques ont besoin des données d'entrée pour pouvoir reproduire la réponse du système (souvent le débit). Ces données sont sujet à des incertitudes pendant l'étape de mesure et de collecte de données. Afin de tester la précision d'un modèle hydrologique, les hydrologues comparent la réponse produite par le modèle aux données observées, également sujet à des incertitudes.

La précision désirée du modèle dépend de la qualité de l'ajustement entre les valeurs simulées et mesurées. Le modèle n'est pas satisfaisant sur la base des valeurs initiales des paramètres utilisées dans le modèle. L'optimisation des paramètres du modèle permet d'améliorer la justesse et la précision du modèle de telle sorte que la différence entre les valeurs simulées et mesurées soit minimale. Ce processus de réglage de paramètres est le processus de calibration.

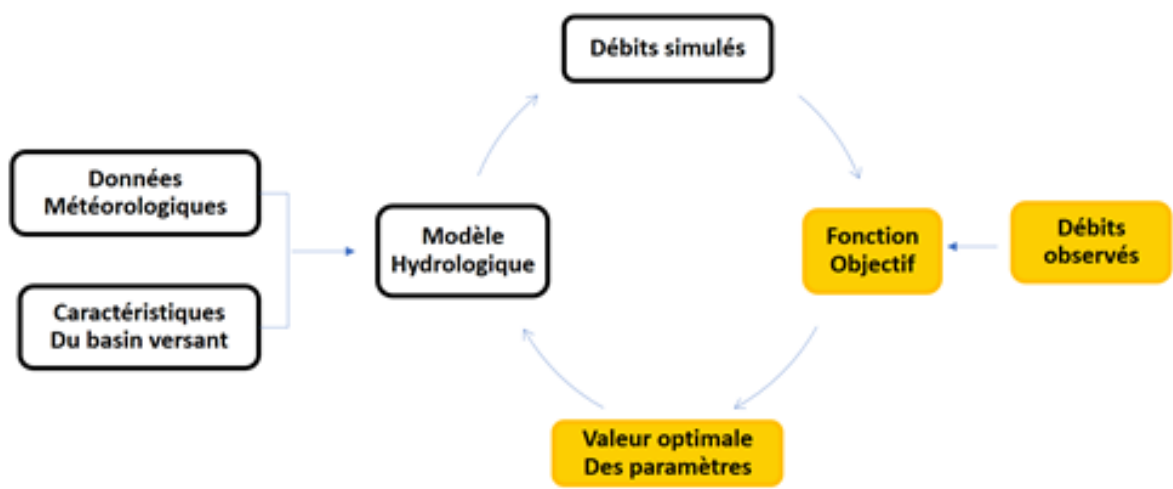


Figure 2-1 : La méthode d'ajustement des paramètres d'un modèle hydrologique

Le concept de l'ajustement des paramètres peut être illustré à la Fig. 2-1, où le bassin versant est représenté à gauche. Le modèle hydrologique, qui est la représentation du système physique est montré à droite, avec les différentes étapes d'ajustement des paramètres du modèle.

2.2.1 Calibration d'un modèle hydrologique

La calibration de modèle couvre le processus de détermination des meilleures estimations pour les paramètres du modèle en comparant les simulations de modèle aux valeurs observées pour un ensemble de sorties, pour une période de temps donnée et pour des conditions fixes. La validation ultérieure du modèle utilise les paramètres obtenus par calibration pour comparer les résultats du modèle aux observations pour des périodes et conditions différentes de celles utilisées en calibration, afin de démontrer la capacité du modèle à effectuer des prévisions suffisamment précises par rapport aux objectifs du modèle. Des algorithmes

d'optimisation sont utilisés pour ajuster les jeux de paramètres afin que les sorties du modèle hydrologique correspondent mieux aux observations au moyen d'une fonction objective.

L'optimisation de la performance et la validité du modèle est généralement effectuée à l'aide des critères de performance statistiques qui analysent les erreurs résiduelles entre les valeurs observées et les valeurs prédites. Dans la littérature, on trouve des analyses comparatives des procédures de calibration et d'évaluation d'un modèle hydrologique, dans (Duan Q. S., 1994) ainsi que (D. N. Moriasi, 2007). La représentation schématique du processus de calibration d'un modèle hydrologique est présentée à la figure 2.2.

La calibration du modèle implique le choix d'une période de calibration représentative et une série de paramètres à calibrer, le choix d'une technique d'évaluation adéquate et la procédure itérative réelle.

La calibration peut comprendre un ou plusieurs paramètres et peut être effectuée en appliquant des fonctions objectives. Des études ont également montré qu'un nombre réduit de paramètres offre généralement des performances de modèle plus précises tout en augmentant le contenu en informations de chaque paramètre (Servat & Dezetter, 1993).

De nombreuses études (Refsgaard, 1996) ont montré que la performance du modèle par rapport à des données indépendantes de la calibration est généralement inférieure à celle obtenue pendant la calibration.

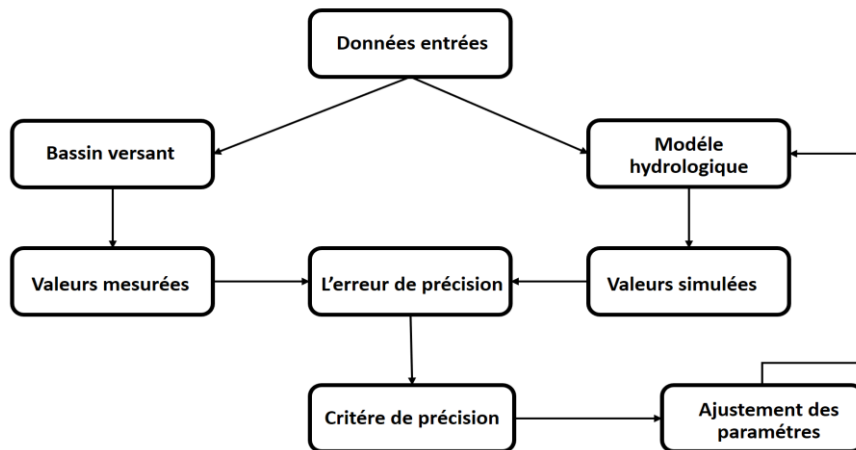


Figure 2-2 : Les différentes étapes d'ajustement des paramètres d'un modèle hydrologique

2.2.2 Degré de correspondance et optimisation des paramètres

Les modèles numériques sont désormais de plus en plus équipés d'une procédure automatisée permettant d'optimiser leurs paramètres. L'optimisation est basée sur des modifications empiriques d'un paramètre alors que les autres valeurs de paramètre sont maintenues constantes. Des données mesurées sont utilisées pour limiter les intervalles de variation des paramètres. Ces données contiennent des incertitudes, ce qui pourrait expliquer la difficulté d'obtenir une parfaite concordance entre les valeurs simulées obtenues par calibration et les valeurs observées.

La qualité de l'ajustement peut être évaluée par mesures statistiques. Les mesures statistiques comprennent l'erreur moyenne, l'erreur moyenne absolue et l'erreur quadratique moyenne entre les variables simulées et observées. La calibration des modèles nécessite deux éléments importants : le choix d'une fonction objective et le choix de l'algorithme d'optimisation. Il est aussi important d'utiliser des critères de convergence. La fonction objective permet de

mesurer la distance entre les valeurs observées et les valeurs simulées de la variable considérée.

Plusieurs fonctions objectives sont proposées dans la littérature (Singh V. , 1995) ; les fonctions objectives les plus courantes sont la fonction Nash-Sutcliffe, la fonction du moindre carré et le coefficient de détermination.

En raison des caractéristiques propres des modèles hydrologiques, ce ne sont pas toutes les méthodes d'optimisation qui sont appropriées à l'utilisation dans la modélisation hydrologique. Parmi ces caractéristiques, on retrouve le nombre important de paramètres à optimiser et leur grande variabilité (Madsen , 2003), l'impossibilité de dériver la fonction objective pour trouver un jeu de paramètres optimal et la performance similaire de plusieurs jeux de paramètres (Beven & Freer, 2001), ce qui peut réduire la confiance en la capacité d'un modèle hydrologique à simuler convenablement les échanges dans un bassin versant.

La méthode d'optimisation la plus largement utilisée en hydrologie depuis son apparition dans la littérature (Duan, Gupta, & Sorooshian, 1993), est la méthode développée par l'université d'Arizona : le SCEUA ``Shuffled Complex Evolution method developed at the University of Arizona``. Une autre méthode a récemment été développée : ``Dynamically Dimensioned Search`` (DDS) (Tolson & Shoemaker, 2007).

2.3 Validation, équifinalité et incertitudes structurelles

L'objectif de la validation est de vérifier que le modèle fournit une représentation raisonnable de la réalité, adaptée à un objectif visé en testant la plausibilité de sa structure et des jeux de paramètres obtenus lors de sa calibration. Un modèle validé arrive à reproduire la réponse d'un bassin versant pour un ensemble d'observations. Un des défis de la modélisation hydrologique est le problème de l'équifinalité (Beven & Binley, 1992). L'équifinalité est présente quand un certain nombre de jeux de paramètres différents produisent des performances de modèle équivalentes. Cela contredit le concept d'un ensemble de paramètres optimaux.

2.3.1 La validation d'un modèle hydrologique

La validation est généralement effectuée en comparant, sur la base de critères sélectionnés et pour différentes variables hydrologiques, les données observées et les données de sortie du modèle obtenues par simulation.

La structure choisie du modèle pour décrire les processus physiques et les valeurs attribuées aux différents paramètres du modèle couplé avec un jeu de données différent de celui utilisé pour la calibration du modèle sont utilisés pour évaluer la représentativité du bassin versant étudié et donc de son hydrologie. Des erreurs et des incertitudes associées à des variables d'entrées du modèle ne devraient pas influencer les résultats obtenus.

Il n'est jamais possible de conclure qu'un modèle décrit parfaitement la réalité. Des événements hydrologiques majeurs qui peuvent être liés à plusieurs raisons (urbanisation, changements climatiques...) sont difficiles à prévoir dans le développement et la validation d'un modèle, puisqu'ils révèlent un comportement hydrologique différent des observations enregistrées précédemment; ce qui explique qu'une ou plusieurs observations ne peuvent pas être expliquées par le modèle. Par ailleurs, il est en principe possible de valider un modèle, c'est-à-dire de vérifier qu'il est raisonnable pour l'objectif visé. Cependant, aucune méthode universelle n'existe pour une telle validation.

2.3.2 Équifinalité et incertitudes

La modélisation hydrologique est associée à des erreurs et des incertitudes de manière systématique. Comprendre et prendre en compte ces incertitudes est un premier pas pour les réduire et les quantifier pour des raisons de recherche ou de modélisation opérationnelle. Traiter ces incertitudes reste une tâche importante et difficile.

Il y a plusieurs sources d'incertitudes impliquées dans la modélisation hydrologique. Une de ces sources d'incertitude sont les erreurs de mesures liées à la collecte des données comme par exemple l'incertitude liée à l'estimation des précipitations. La structure du modèle est une autre source d'incertitude causée par la représentation simplifiée des processus hydrologiques.

L'estimation des paramètres du modèle hydrologique pendant la calibration peut générer aussi des incertitudes. Les incertitudes générées pendant l'estimation des paramètres sont attribuées au problème d'équifinalité. Ce problème se pose quand différents ensembles de paramètres sont associés à la même mesure optimale de performance et produisent des prévisions similaires. Cela implique que toute valeur de paramètre déterminée par calibrage sera dépendante des autres valeurs des paramètres du modèle. Ainsi, toute interprétation physique des valeurs doit être effectuée avec soin. Si la méthode utilisée pour calibrer les paramètres du modèle hydrologique n'est pas adaptée de manière raisonnée pour réduire de tels problèmes d'équifinalité, il peut en résulter des performances médiocres.

Chapitre 3

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Pendant longtemps, afin de comprendre les processus naturels intervenant dans le cycle de l'eau, les hydrologues ont collecté des données générées en grande partie par une gamme d'instruments et de méthodes d'observation des variables hydrologiques sur le terrain. La nature localisée des méthodes de mesure sur le terrain, l'accessibilité difficile de certains endroits, les contraintes des frontières politiques et la maintenance des instruments sont quelques facteurs qui limitent la disponibilité et la précision des données hydrologiques collectées. Plusieurs raisons liées aux coûts et à la formation des personnes qualifiées interviennent aussi pour ralentir l'apparition des nouvelles techniques comme les techniques de télédétection basées sur l'utilisation des radars et des appareils à ultrasons.

Le Québec est la plus grande province du Canada. Il est situé dans une zone de transition entre le centre et l'est du pays. Le CEHQ (Centre d'expertise hydrique du Québec) a subdivisé l'ensemble du Québec en 13 régions hydrographiques. Chaque région est formée de plusieurs bassins en fonction de leurs réalités hydrologiques et écologiques. Le CEHQ récupère des données provenant de plus de 650 stations hydrométriques de type « débit », dont plus de 200 sont toujours en activité. Les données les plus anciennes remontent à 1910 (donnée journalière) et jusqu'à 1997 pour la majorité des 280 stations disposant des données instantanées. Un minimum de trois années d'enregistrement est disponible par station.

Cette étude consiste à réaliser plusieurs simulations à l'aide de quatre modèles hydrologiques conceptuels (GR4J, HBV, MOHYSE, HMETs) sur 125 bassins versants répartis à travers la province du Québec pour représenter la diversité physiographique de la province. Ils disposent des stations de mesures actuellement fonctionnelles et d'un historique d'une dizaine d'années de mesures (Figure 3-1). Les données collectées dans le réseau de stations hydrométriques exploitées par le CEHQ sont

utilisées. La taille des bassins versants varie de 211 à 143,000 km² et la capacité maximale de leurs réservoirs se situe entre 74,000 et 25 milliards de m³.

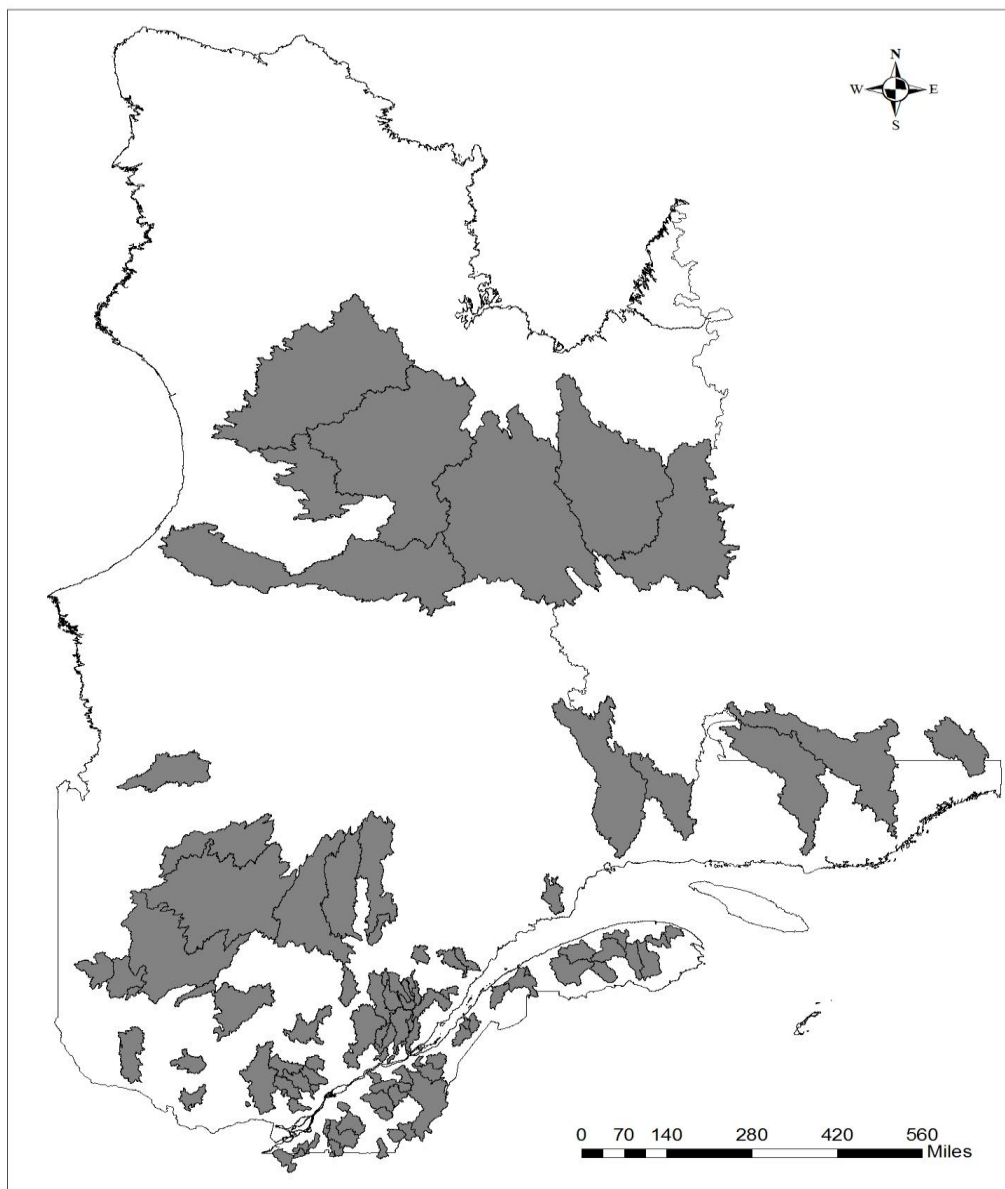


Figure 3-1 : Carte de localisation des bassins versants étudiés dans la province du Québec
(Réalisé avec ArcGis)

La sélection de ces stations a été basée sur plusieurs critères. On peut citer :

- L'existence d'une station de mesure fonctionnelle de débit à l'exutoire du bassin versant.

- L'utilisation des bassins versants avec des cours d'eau naturels, qui ne sont pas influencés par l'activité humaine.
- La mesure continue du débit pendant une période d'au moins 10 ans.

La superficie des bassins versants des rivières naturelles varie de 20 à 50,000 km². L'altitude des bassins varie entre 36 m et 862 m. Les données de débit analysées ont été extraites des données collectées par le Centre d'expertise hydrique du Québec.

Un élément fondamental de la modélisation hydrologique est la collecte et le traitement de différents jeux de données nécessaires pour les simulations hydrologiques. Certaines données doivent être adaptées pour pouvoir les intégrer dans des modèles spécifiques. Les données topographiques contiennent des informations cruciales pour le débit des eaux de surface et l'interaction entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Le modèle numérique d'élévation utilise l'altitude pour déterminer le sens de l'écoulement des eaux de surface et pour délimiter le réseau de drainage qui limite les bassins hydrographiques ainsi que leurs caractéristiques.

Il est indispensable de disposer des données observées sur le terrain pour pouvoir utiliser pleinement les modèles hydrologiques. Dans plusieurs cas, toutes ces données ne sont pas facilement accessibles ou n'existent même pas. Une complication supplémentaire est que ces modèles, en plus des données hydrométéorologiques traditionnelles, requièrent de nombreuses autres sources de données, telles que celles issues de l'agriculture, des études géologiques et topographiques.

Des réseaux de mesure sont disponibles pour déterminer les variables météorologiques (par exemple : les précipitations, la température, la vitesse du vent). Des stations de mesure de débit sur les rivières sont disponibles pour mesurer les débits journaliers et d'autres variables hydrologiques. Les données de niveaux d'eau souterraine sont également disponibles dans de nombreux puits. De nombreuses autres données telles que l'évapotranspiration, les pentes du terrain, la densité de drainage, la couverture du sol et la teneur en humidité peuvent être obtenues à partir de régions

spécifiques locales. Par conséquent, la plupart des modèles peuvent fonctionner avec différents niveaux de disponibilité des données.

3.1 Description des données utilisées

Au Québec, les données hydrométriques sont collectées et traitées par divers organismes. Le réseau de mesures hydrologiques québécois compte quelque 250 stations hydrométriques réparties sur plus de 190 lacs et cours d'eau. Une grande partie de ce réseau est exploité par le Centre d'expertise hydrique du Québec. Les données météorologiques ont été fournies par Le Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) qui possède des stations de mesure sur l'ensemble du territoire Québécois.

Dans cette étude, la modélisation hydrologique pour les quatre modèles a été exécutée sur un pas de temps journalier en utilisant cinq zones d'altitude différentes. La période de simulation pour les quatre modèles était une période de quinze ans allant de 2000 à 2015, précédée d'une période d'échauffement d'un an. La période d'échauffement du modèle est un processus d'ajustement permettant au modèle d'atteindre un état optimal, pour réduire la dépendance du modèle aux variables d'état des conditions initiales.

3.1.1 Données hydrométriques

Des données hydrométriques, issues des stations de jaugeage du CEHQ, dont la moyenne est distribuée spatialement sur chaque bassin versant pour la période entre 1975 à 2015, ont été utilisées dans cette étude. Ces données correspondent aux débits moyens journaliers issus des stations de jaugeage du CEHQ.

3.1.2 Données météorologiques

Les données météorologiques de cette étude ont été fournies par le MELCC et Environnement Canada. Elles correspondent aux précipitations totales journalières (en mm), aux températures

journalières minimales, maximales et moyennes (en °C), au rayonnement solaire incident (en W/m²) et à l'humidité relative (en %). La qualité des données varie en fonction de la densité de stations disponibles. Nous constatons que les régions hydrographiques au nord de la province présentent une densité très faible de stations.

3.2 Méthode de Monte Carlo

La méthode de Monte Carlo est une version simplifiée de l'approche des probabilités conjointes. Elle a été utilisée dans cette étude pour étudier les valeurs des débits simulés en utilisant les résultats d'un grand nombre d'essais avec des ensembles de paramètres générés de manière aléatoire pour chaque modèle hydrologique. L'idée est de simuler le débit un nombre de fois suffisant (500 000 simulations) pour différents jeux de paramètres, puis de comparer le débit observé sur le bassin versant avec les débits simulés obtenus pour tous les jeux de paramètres considérés. En ce sens, supposons que les paramètres suivent tous la même loi de probabilité, et que cette loi commune soit la plus simple, la loi uniforme, c'est-à-dire que toutes les valeurs soient équiprobables, alors la distribution des débits de sortie peut être déterminée en simulant les scénarios convergeant vers une marge de débit souhaitable. Cela implique de mener un très grand nombre d'expériences sur un ordinateur.

Pour chaque paramètre, des plages de valeurs possibles ont été définies en fonction de la plage de valeurs calibrées d'autres applications du modèle (Bergström 1990; Braun et Renner 1992). Les valeurs possibles pour chaque paramètre sont les valeurs comprises entre la valeur maximale du paramètre et sa valeur minimale, ils sont répertoriés dans les tableaux des paramètres de chaque modèle (Tableaux 3.1, 3.2, 3.3, 3.4).

Après les analyses initiales, les plages de valeurs des paramètres ont été étendues pour inclure les paramètres pour lesquels les meilleures simulations étaient proches du minimum ou du maximum.

500,000 jeux de paramètres ont été générés à l'aide de nombres aléatoires à partir d'une distribution uniforme dans les plages données pour chaque paramètre (tableaux 3-1, 3-2, 3-3 et 3-4). Le

modèle a été exécuté pour chaque jeu de paramètres et les valeurs des débits simulées ont été calculées. Les débits simulés ont été générés sous forme de combinaisons aléatoires des entrées et des paramètres.

3.3 Modèles hydrologiques

Une bonne évaluation des ressources en eau nécessite à la fois l'accès à des données hydrologiques et l'application de techniques de modélisation appropriées. Dans les cas où l'accent est mis entièrement sur les eaux de surface, les outils de modélisation pertinents sont souvent des modèles pluie-débit du type conceptuel.

Une large gamme de modèles pluie-débit sont disponibles dans la littérature (Beven, 2012). Nous avons choisi quatre modèles (HBV, GR4J, MOHYSE et HMETs). Ce sont les plus couramment utilisés en hydrologie; ils sont basés sur un modèle conceptuel et global. Trois d'entre eux sont des modèles globaux (GR4J, MOHYSE et HMETs), l'un est un modèle semi-distribué (HBV). Leurs structures sont simples et peuvent être appliquées aux bassins versants nordiques dominés par une couverture neigeuse. De plus, ces modèles offrent toute une gamme de structures de modèle différentes. Une description de chacun de ces modèles est donnée ci-après.

3.3.1 Le modèle hydrologique GR4J

Le modèle GR4J (Perrin, Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative, 2000) est un modèle hydrologique conceptuel global journalier comportant quatre paramètres libres. Il utilise un réservoir de production et un autre réservoir de routage pour simuler le flux sortant en fonction de deux entrées de données; les précipitations journalières et l'évapotranspiration potentielle. Les quatre paramètres de GR4J, qui doivent être calibrés avec les débits observés, sont répertoriés dans le tableau 1.1. L'évapotranspiration potentielle a été calculée à l'aide du modèle empirique d'évapotranspiration potentielle proposé par Oudin (Oudin, 2004) basé sur

la température moyenne quotidienne et le rayonnement extraterrestre. Cette équation a été spécifiquement développée pour être utilisée comme entrée pour le modèle pluie-débit journalier.

Dans la zone d'étude, aucun enregistrement de rayonnement extraterrestre n'est disponible. C'est pourquoi nous avons utilisé les formules empiriques proposées par (Allen, Smith, Raes, & Pereira, 1998) pour calculer le rayonnement extraterrestre en fonction de la période et de la température moyenne. Pour que le modèle fonctionne correctement sur les bassins versants du Québec, le modèle GR4J doit être associé au module de fonte CemaNeige (Valery, 2010), qui simule l'évolution de la couverture neigeuse au cours du temps. CemaNeige a deux paramètres libres (tableau 3-1). Pour tenir compte de l'évolution différenciée du manteau neigeux en fonction de l'altitude, les bassins versants doivent être séparés en cinq zones d'altitude. En utilisant la température moyenne quotidienne et l'altitude moyenne de chaque zone, CemaNeige calcule la moyenne de neige et de pluie dans les précipitations totales. La couverture de neige est alimentée par une partie solide des précipitations et la fusion est calculée en fonction de l'état thermique de la couverture. La fonte est ensuite ajoutée aux précipitations pour être utilisée par le modèle GR4J comme quantité finale d'eau pour calculer le débit sortant.

Tableau 3-1 : Paramètres de GR4J et CemaNeige

Modèle	Paramètres	Min	Max	unité
GR4J	X1 : Capacité maximale du réservoir de production	20	2000	mm
	X2 : Coefficient d'échanges souterrains	-10	10	mm/jour
	X3 : Capacité maximale du réservoir de routage	10	1000	mm
	X4 : Temps de base de l'hydrogramme unitaire	0.5	24	jour
CemaNeige	X5 : Facteur degré-jour	0	1	mm/jour/°C
	X6 : Coefficient de pondération d'état thermique du manteau neigeux	0	30	adimensionnel

Le facteur degré-jour de CemaNeige X5 a montré très peu de sensibilité entre les périodes. Son influence est négligeable. Dans notre cas, sa valeur a été fixée.

3.3.2 Le modèle hydrologique HBV

HBV est un modèle conceptuel global, mis au point par l'Institut suédois de météorologie et d'hydrologie (Bergstrom, 1976). Il est basé sur le concept des réservoirs de stockage, qui peut fonctionner sur une base temporelle journalière ou mensuelle. Une version simplifiée (Aghakouchak & Habib, Application of a Conceptual Hydrologic Model in Teaching Hydrologic Processes, 2010) avec dix paramètres est utilisée dans cette étude.

Ce modèle suppose que les paramètres ne soient pas modifiés dans l'espace. La structure du modèle repose sur deux réservoirs superposés. Des séries chronologiques de températures et de précipitations observées sont nécessaires pour chaque étape du modèle, ainsi que des estimations mensuelles de l'évapotranspiration potentielle et de l'altitude pour la discrétisation spatiale dans les zones homogènes du bassin.

Les précipitations sont traitées comme de la neige ou des précipitations dépendant de la température à chaque étape de la journée. L'évapotranspiration potentielle est calculée par le modèle proposé par (Oudin, 2004). Les processus hydrologiques sont subdivisés en quatre composantes principales différentes ; la première est liée à l'accumulation de neige et à la fonte des neiges ; la seconde aux précipitations effectives et au sol ; La troisième aux eaux souterraines, et une quatrième pour le calcul de la propagation des crues (tableau 3-2).

Tableau 3-2 : Paramètres du Modèle HBV

Modèle	Paramètres libres	Min	Max	Unité
HBV	K0 : Coefficient puissance de vidange du réservoir supérieur	0.05	0.2	jour ¹
	Béta : Paramètre puissance du modèle (infiltration)	1	7	Adimensionnel
	C : Coefficient de correction de l'évapotranspiration	0.01	0.07	1/°C
	DD : Quantité d'eau provenant de la neige accumulée pour 1°C au-dessus de 0°C	3	7	mm/jour/°C
	FC : Seuil de saturation du sol	100	200	mm
	L : Seuil du ruissellement direct	2	5	mm
	K1 : Coefficient de vidange dans le réseau hydrographique	0.01	0.1	jour ⁻¹
	K2 : Coefficient de vidange dans le réseau	0.01	0.05	jour ⁻¹
	Kp : Coefficient de percolation	90	180	mm
	PWP : Seuil à partir duquel l'évapotranspiration est potentielle			

3.3.3 Le modèle hydrologique MOHYSE

MOHYSE signifie Modèle Hydrologique Simplifié à l'Extrême et est un modèle hydrologique simple qui a été développé à partir de 2004 à l'Université du Québec à Montréal (UQAM) pour la recherche scientifique (Fortin & Turcotte , 2007). Depuis, le modèle a été utilisé par plusieurs scientifiques, on peut entre autres citer les travaux de Velazquez (Velazquez , Anctil , Ramos , & Perrin , 2011) . MOHYSE est un modèle hydrologique global conceptuel spécialement conçu pour gérer les bassins versants nordiques. Il possède un module d'accumulation de neige personnalisé, ainsi que d'autres modules comme le module qui décrit l'évapotranspiration potentielle (ETP).

MOHYSE transforme les données météorologiques suivant un schéma de production présenté dans l'annexe A en un débit à la sortie du bassin versant. MOHYSE requiert les températures journalières moyennes, et les précipitations totales journalières pour fonctionner adéquatement, en plus d'un minimum d'information sur le bassin versant (la superficie et la latitude.) Il a dix paramètres libres (tableau 3-3) devant être calibrés. L'intérêt d'utiliser le modèle MOHYSE est qu'il a été créé dans le but de minimiser le nombre de paramètres afin d'améliorer leur identifiabilité et de réduire leur interdépendance.

Tableau 3-3 : Paramètres du Modèle MOHYSE

Modèle	Paramètres libres	Min	Max	Unité
MOHYSE	Cetp : coefficient d'ajustement de l'évapotranspiration potentielle	2	0.5	mm/jour
	CTR : coefficient d'ajustement de la transpiration	1	0.5	jour ⁻¹
	Cf : taux de fonte	4	2	mm/°C /jour
	Tf : température seuil pour la fonte	0	0	
	Cinf : taux maximal d'infiltration (mm/Δt)	15	5	°C
	CVA : coefficient de vidange de la zone vadose vers l'aquifère	0.04	0.02	mm/jour
	Cv : coefficient de vidange de la zone vadose vers le cours d'eau	0.05	0.01	jour ⁻¹
	CA : coefficient de vidange de l'aquifère vers le cours d'eau	0.02	0.05	jour ⁻¹
	α : paramètre de forme de l'hydrogramme	3	3	adimensionnel
	β : paramètre d'échelle de l'hydrogramme	3	3	adimensionnel

3.3.4 Le modèle hydrologique HMETs

HMETs (Hydrological Model -École de technologie supérieure) (Martel, Demeester, Brissette, Poulin, & Arsenault, HMETs-A simple and efficient hydrology model for teaching hydrological modelling, flow forecasting and climate change impacts, 2017) est un modèle global conceptuel conçu à l'École de technologie supérieure (ETS). C'est un modèle simple et efficace pour l'enseignement de la modélisation hydrologique, de la prévision des débits et des changements climatiques. Ce modèle comporte 21 paramètres (tableau 3-4) utilisés lors des calibrations pour simuler les principaux processus hydrologiques (l'évapotranspiration, l'accumulation et la fonte de neige et les apports horizontaux et verticaux). HMETs se base sur un système de réservoirs pour produire des débits à l'aide de modules simulant les différents processus hydrologiques. Les différentes données d'entrées nécessaires au fonctionnement du modèle HMETs sont les précipitations totales journalières et les températures journalières moyennes.

Tableau 3-4 : Paramètres du modèle HMETS

Modèle	Paramètres	Min	Max	unité
HMETS	ETeff: Fraction de l'évapotranspiration potentielle	0	3	
	ddfmin: facteur degré-jour minimum	0	20	mm/°C/jour
	ddfplus: facteur degrés-jours maximum	0	20	mm/°C/jou
	Tbm: température de fusion de la base	-2	3	r
	Kcum; Paramètre empirique pour le calcul du facteur degrés-jours	0.01	0.2	°C
	Fcmin: fraction minimale pour la capacité de rétention d'eau du manteau neigeux	0	0.1	mm-1
	Fcplus: fraction maximale pour la capacité de rétention d'eau du manteau neigeux	0.01	0.25	mm-1
	Ccum: Paramètre pour le calcul de la capacité de rétention d'eau	0.005	0.05	mm-1
	Tbf: Température de base pour la congélation	-5	2	mm-1
	Kf: facteur degrés-jours pour la congélation	0	5	°C
	Fe: Exposant empirique pour l'équation de congélation	0	1	mm/°C/jour
	Cr: fraction de l'eau pour le ruissellement de surface tardif	0	1	adimensio
	Cvp: fraction de l'eau pour la recharge des eaux souterraines	0.00001	0.02	nnel
	Cv: fraction de l'eau pour le flux hypodermique	0	0.1	mm
	Cp: fraction de l'eau pour l'écoulement des eaux souterraines	0.00001	0.01	mm
	LVmax: niveau maximum de la zone vadose	0	500	mm
	LPmax: niveau maximum de la zone phréatique	0	2000	mm
	$\alpha 1$: paramètre de forme α utilisé sur l'hydrogramme	0.3	20	mm
	$\beta 1$: paramètre de débit β utilisé sur l'hydrogramme	0.01	5	mm
	$\alpha 2$: paramètre de forme α utilisé sur l'hydrogramme	0.5	13	adimensionnel
	$\beta 2$: paramètre de débit β utilisé sur l'hydrogramme	0.15	1.5	adimensionnel

3.4 Méthode de la covariance

Bien que l'approche traditionnelle pour valider un modèle hydrologique procède d'abord à la calibration pour l'estimation des paramètres, puis à la validation des paramètres avec de nouvelles données, une erreur de modèle inévitable peut fausser le processus de validation. Vogel et Sankarasubramanian (Vogel & Sankarasubramanian, 2003) recommandent que la validation soit effectuée avant et indépendamment de l'estimation des paramètres. Ils ont proposé une méthode basée sur l'autocorrélation et la corrélation croisée (Vogel & Sankarasubramanian, 2003).

La méthode proposée par (Vogel & Sankarasubramanian, 2003) se base sur les relations analytiques entre les séries temporelles des données d'entrée du modèle (précipitations et

évapotranspiration dans notre cas) avec les séries temporelles des données de sortie du modèle (le débit à l'exutoire dans notre cas). Ceci permet de vérifier si une valeur de nuages des paramètres introduite dans le modèle peut reproduire et capturer les caractéristiques du bassin versant (le débit observé). Ils ont déterminé qu'un modèle de bassin versant pourrait être validé en reproduisant ces relations. L'approche de covariance s'applique en trois étapes :

La première étape : pour chaque paramètre, des plages de valeurs ont été échantillonnées de manière uniforme (méthode de Monte Carlo). 500,000 jeux de paramètres indépendants ont été sélectionnés.

La deuxième étape : pour chaque jeu de paramètres, des séries de valeurs de débit ont été simulées sur la base des données d'entrée du modèle (précipitations et évapotranspiration). Pour chacune de ces séries de débit simulé, un ensemble de covariances (entre les données d'entrée et le débit simulé) a été calculé.

La troisième étape : déterminer graphiquement si le débit observé se retrouve dans l'espace des valeurs de débit simulé obtenu à travers 500,000 différents jeux de paramètres.

3.4.1 Covariance et corrélation

Les variations simultanées de deux variables aléatoires X et Y sont caractérisées par la covariance, $Cov(X, Y)$ définie de manière analogue à la variance.

$$Cov(X, Y) = E[(X - E[X])(Y - E[Y])] = E(X \cdot Y) - E(X) \cdot E(Y) \quad (1)$$

où $E[X]$ désigne l'espérance mathématique de X . Si la variable X prend une infinité dénombrable de valeurs x_1, x_2, \dots , avec les probabilités p_1, p_2, \dots , l'espérance de X est définie comme suit :

$$E[X] = \sum_{i=1}^{\infty} x_i p_i \quad (2)$$

L'importance de la covariance dépend de l'échelle des variables et de leurs unités de mesure. Une mesure plus significative est le coefficient adimensionnel de corrélation.

$$\rho_{X,Y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E(X.Y) - E(X).E(Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (3)$$

où σ_X, σ_Y sont les écarts-types des variables X et Y avec $\rho_{X,Y} = \rho_{Y,X}$

La corrélation prend des valeurs comprises entre -1 et 1. Elle caractérise les variations simultanées des deux variables X et Y : elle sera positive lorsque les écarts entre les deux variables ont tendance à être de même signe et négative dans le cas contraire. Lorsque $|\rho_{X,Y}| = 1$, alors une relation linéaire parfaite existe entre X et Y .

3.4.2 Autocorrélation

L'autocorrélation est un outil mathématique souvent utilisé en traitement du signal. Il fait référence au fait que dans une série temporelle ou spatiale, la mesure d'un phénomène à un instant donné peut être corrélée aux mesures précédentes ou aux mesures suivantes. L'autocorrélation est courante en hydrologie. Sa présence signifie que les valeurs des échantillons successifs ne sont pas indépendantes. Une série autocorrélée est la corrélation croisée d'une série temporelle discrète par une version décalée dans le temps d'elle-même avec un décalage (lag) donné.

$$\rho_{kX} = \frac{E[(x_{(i)} - \mu_X) \cdot (x_{(i+k)} - \mu_X)]}{\sigma_X^2} \quad (4)$$

L'autocorrélation permet de détecter des régularités, des profils répétés dans une série. Nous avons commencé par étudier l'autocorrélation du débit annuel pour le débit observé et le débit simulé pour chaque bassin versant pour chaque modèle hydrologique.

3.4.3 Corrélation croisée

La corrélation croisée (aussi appelée covariance croisée) fait référence aux mesures de degré de similitude entre deux séries temporelles ou spatiales. Si la corrélation croisée vaut 0, les fonctions sont dites non-corrélées. Dans cette étude on a calculé la corrélation croisée entre les précipitations annuelles, l'évapotranspiration potentielle annuelle et le débit annuel pour chaque bassin versant à l'aide des quatre modèles hydrologiques.

$$\rho_{Q,P} = \frac{Cov(Q,P)}{\sigma_Q \sigma_P} = \frac{E(Q.P) - E(Q).E(P)}{\sigma_Q \sigma_P} \quad (5)$$

Et

$$\rho_{Q,E_p} = \frac{Cov(Q,E_p)}{\sigma_Q \sigma_{E_p}} = \frac{E(Q.E_p) - E(Q).E(E_p)}{\sigma_Q \sigma_{E_p}} \quad (6)$$

Chapitre 4

ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre expose les résultats obtenus lors des travaux de cette étude. Dans un premier temps, les résultats associés à l'application de la méthode de la covariance sur les quatre modèles hydrologiques (GR4J, HBV, MOHYSE, HMETs) pour les 125 bassins versants seront présentés. Ensuite, le cas des bassins versants inadaptés avec les structures des quatre modèles hydrologiques sera abordé. Pour terminer, les cas des bassins versants adaptés à la structure des quatre modèles hydrologiques seront présentés.

Les variables d'une ou plusieurs séries de données peuvent être liées pour de nombreuses raisons ; comme une variable légèrement associée à une autre variable ou deux variables qui dépendent d'une troisième variable inconnue. La relation statistique entre deux variables est appelée leur corrélation. Une corrélation peut être positive, signifiant que les deux variables évoluent dans le même sens ; ou négative, ce qui signifie que lorsque la valeur d'une variable augmente, les valeurs des autres variables diminuent. La corrélation peut également être neutre ou nulle, ce qui signifie que les variables ne sont pas liées. Cela peut être utile dans l'analyse et la modélisation des données pour mieux comprendre les relations entre les variables. Ce qui nous intéresse dans ce travail est la corrélation entre les variables d'entrée et la variable de sortie afin de mieux comprendre quelles variables peuvent ou non être pertinentes pour le développement d'un modèle.

En statistique, les deux termes corrélation et covariance mesurent la relation et la dépendance entre deux variables. La covariance indique la linéarité entre deux variables. La corrélation pour sa part, mesure la force et la direction de la linéarité entre deux variables. La corrélation est une fonction de la covariance. Ce qui les distingue est le fait que les valeurs de corrélation sont normalisées alors que les valeurs de covariance ne le sont pas. Il est possible d'obtenir le coefficient de corrélation de deux variables en divisant la covariance de ces variables par le produit des écarts-types des mêmes valeurs.

La corrélation entre deux variables ou plus désigne la liaison qui peut exister entre elles. Nous avons plusieurs variables à étudier dans cette étude : les deux premières variables sont le débit annuel observé et le débit annuel simulé utilisées à l'étude de l'autocorrélation et de la corrélation croisée. Les deux autres variables sont les précipitations annuelles et l'évapotranspiration potentielle annuelle qui ont servi à l'étude de la corrélation croisée.

La méthode statistique de la variance-covariance (Vogel & Sankarasubramanian, 2003) a été utilisée pour évaluer la corrélation entre les séries temporelles hydrologiques. Cette méthode est basée sur des calculs d'autocorrélation et de corrélation croisée. On a utilisé cette méthode pour comparer les relations entre les valeurs simulées et observées à travers le calcul de :

- La corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit annuel et l'autocorrélation du débit annuel pour le débit observé et le débit simulé pour chaque bassin versant à l'aide des quatre modèles hydrologiques utilisés dans cette étude.
- La corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit, et l'autocorrélation du débit annuel pour le débit observé et le débit simulé pour chaque bassin versant à l'aide des quatre modèles hydrologiques utilisés dans cette étude.

Tous ces calculs d'autocorrélation et de corrélation croisée, ont été effectués et programmés sur Matlab. Étant donné que nous avons 125 bassins versants (Annexe B) et quatre modèles hydrologiques, il est difficile de tous les présenter. Nous avons choisi de les regrouper selon quatre groupes de bassins versants en fonction des bassins validés par chaque modèle hydrologique.

4.1 Les résultats par modèle hydrologique

Nous appellerons « modèle » un ensemble d'hypothèses relatives aux relations qui s'établissent entre plusieurs variables considérées comme formant un système. Le fondement d'un modèle peut être une théorie plus générale ; un modèle peut aussi résulter d'une tentative d'explication intégrée de résultats antérieurs. Une des richesses des modèles hydrologiques conceptuels tient au fait que les variables à propos desquelles on formule des hypothèses peuvent être observées et que les relations peuvent être de différents types, traduisant l'hypothèse d'une simple association entre variables.

La question qu'on se pose est de savoir si l'on peut rendre compte de la structure des relations entre variables observées, telle qu'elle se manifeste dans les covariations de ces variables, à l'aide du modèle considéré. On vérifie l'adéquation des quatre modèles (GR4J, HBV, MOHYSE, HMETs) avec chaque bassin versant en comparant les données reconstruites à l'aide du modèle aux données observées.

Le résultat de cette étape peut conduire à considérer le modèle comme compatible avec les données, à modifier le modèle initial jusqu'à ce que l'accord soit jugé satisfaisant ou à choisir d'autres modèles. Rappelons la façon dont on procède pour juger de l'adéquation d'un modèle aux données.

Pour porter ce jugement d'adéquation, il faut tout d'abord s'assurer que le modèle est identifié et que la solution ne comporte pas de valeur non admissible pour certains paramètres (par ex. des variances négatives, des corrélations supérieures à 1 en valeur absolue). Il faut ensuite vérifier l'écart entre la valeur de covariances observée et les valeurs des covariances reconstruites à l'aide des jeux de paramètres générés pour chaque modèle.

Tel qu'il a été décrit précédemment, la méthode de la covariance examine essentiellement les implications du modèle en ce qui concerne les covariances (ou les corrélations) entre variables. Elle est appliquée individuellement sur une version Journalière des quatre modèles (GR4J, HBV, MOHYSE, HMETs). Il est toujours possible d'estimer les covariances entre l'entrée et la sortie du modèle pour différentes combinaisons de paramètres du modèle à l'aide de la simulation informatique (code Matlab). Il arrive que l'on constate qu'il y a une telle différence dans l'adéquation des modèles aux données que certains d'entre eux peuvent être rejetés tandis que d'autres restent acceptables.

Dans cette section, nous appliquons l'approche de covariance décrite dans la section précédente sur les 125 bassins versants. Les données de débit Q ont été obtenues du CEHQ sur une période de 15 ans allant de 2000 à 2015.

4.1.1 Modèle hydrologique GR4J

Nous commençons par calculer les covariances pour évaluer le modèle hydrologique GR4J par rapport à l'objectif de modélisation souhaité. Supposons que le modèle vise à reproduire l'autocorrélation du débit observé de la sortie ρ_Q et la corrélation croisée observée entre l'entrée (précipitation et l'évapotranspiration) et la sortie (le débit simulé), $\rho_{Q,P}, \rho_{Q,E_p}$, en utilisant un pas de temps annuel.

La figure 4-1; est construite de manière à illustrer l'espace complet des valeurs de l'autocorrélation du débit observé de la sortie ρ_Q et la corrélation croisée observée $\rho_{Q,P}$, que le modèle GR4J est capable de reproduire en utilisant un pas de temps annuel.

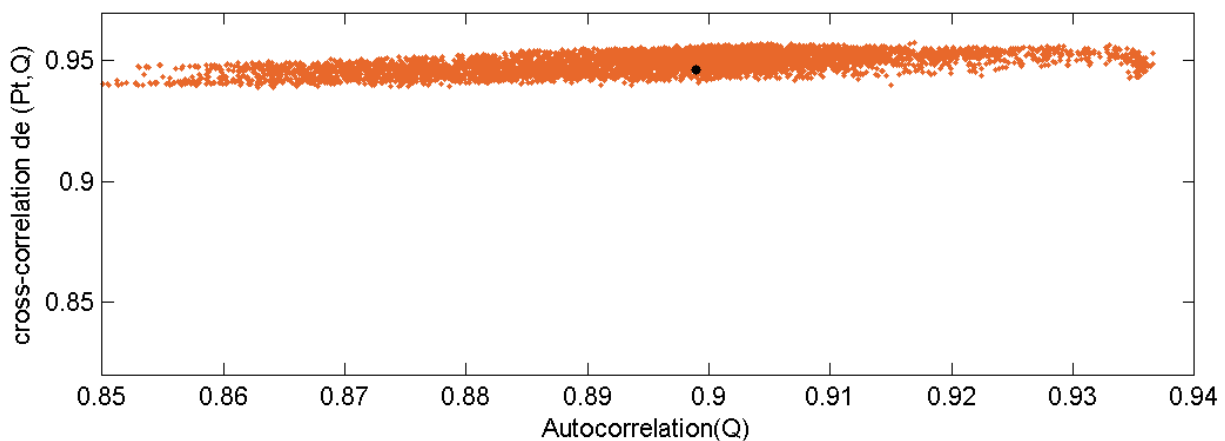


Figure 4-1 : Valeurs de l'autocorrélation du débit observé de la sortie ρ_Q et la corrélation croisée observée $\rho_{Q,P}$, pour le modèle GR4J appliqué au bassin versant aux saumons

Le nuage de points est le résultat de 500,000 jeux de paramètres générés par la méthode de Monte Carlo qui utilisait les équations (4) - (5) pour calculer la relation entre ρ_Q et $\rho_{Q,P}$. Le nuage de points illustre l'espace d'échantillonnage possible de ces deux covariances que le modèle GR4J peut reproduire dans le cas du bassin versant aux saumons en représentant toutes les combinaisons possibles des paramètres du modèle.

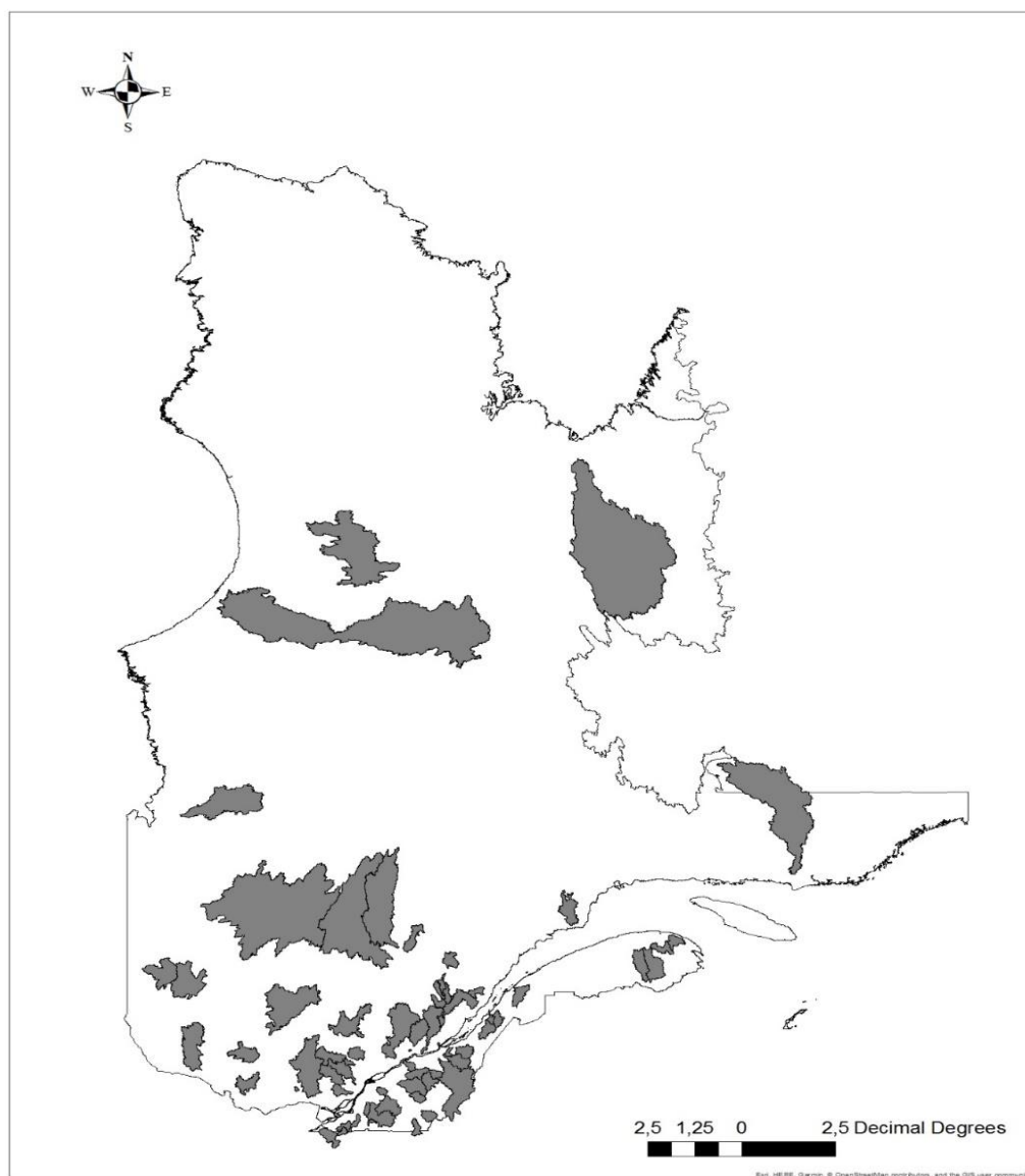
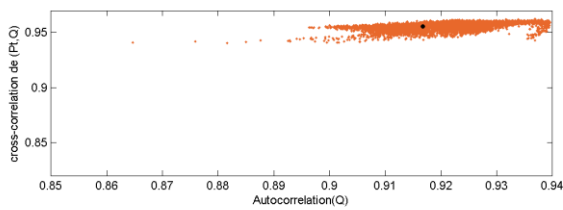


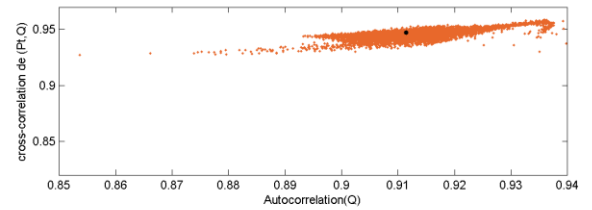
Figure 4-2 : Bassins versants adéquats avec la structure du modèle hydrologique GR4J
(Réalisé avec ArcGis)

Les résultats obtenus montrent que la structure du modèle hydrologique GR4J est adéquate à décrire les échanges hydrologiques dans 73 bassins versants (Figure 4-3). Les bassins et leurs régions sont présentés à l'annexe C. Si on tient compte de plusieurs difficultés (manque de données dans le nord de la province...), le grand nombre de bassins versant adaptée à la structure du modèle représente une excellente performance du modèle GR4J par rapport aux autres modèles.

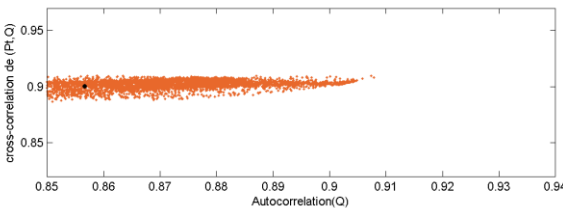
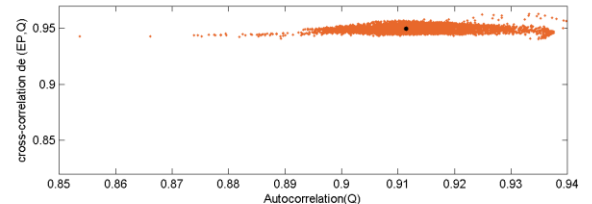
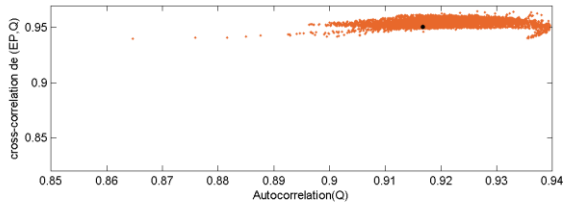
La figure 4.3 présenter les résultats de quatre bassins (Bassin versant de Mistassini, Bassin Versant aux pommes, Bassins versant des anglais 1, Bassin versant Etchemin). Il compare la valeur observée de la corrélation croisée du débit avec les précipitations $\rho_{Q,P}$ et avec l'évapotranspiration $\rho_{Q,Ep}$ en fonction de l'autocorrélation ρ_Q . Les nuages de points montrent les valeurs simulées par le modèle GR4J de la corrélation croisée du débit avec les précipitations $\rho_{Q,P}$ et avec l'évapotranspiration $\rho_{Q,Ep}$ en fonction de l'autocorrélation ρ_Q pour chacun des paramètres. Les résultats des autres bassins sont présentés à l'Annexe G.



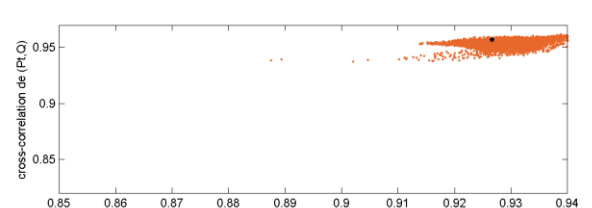
Bassin Versant de Mistassini



Bassin Versant Aux pommes



Bassin Versant de Des anglais 1



Bassin Versant de Etchemin

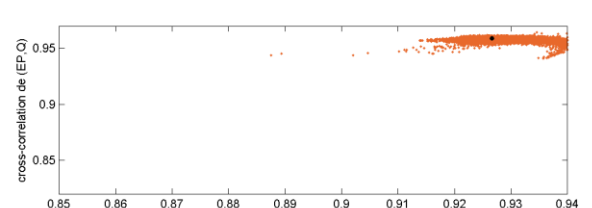
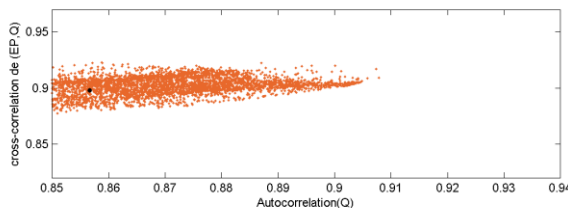
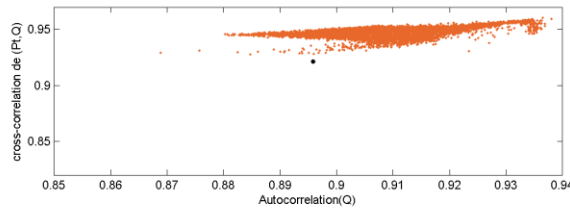


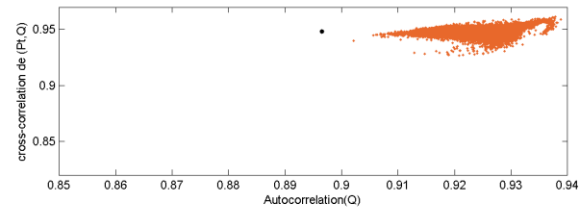
Figure 4-4 : Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1^{ère} graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, $\rho_{Q,P}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2^{ème} graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit $\rho_{Q,EP}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q , dans le cas de quatre bassins versants adaptés au modèle GR4J

Dans le cas des bassins versants adaptée au modèle GR4J, les points sont regroupés autour de la valeur observée, la relation entre l'observation et les valeurs simulées par le modèle GR4J est positive ou directe (figure 4-4). Le modèle GR4J a pu reproduire les covariances de la valeur observée. Pour le modèle GR4J, cette façon d'explorer l'espace paramétrique permet de tirer quelques conclusions. Par exemple, la figure (4-5), montre le cas de quatre bassins versants où aucune relation

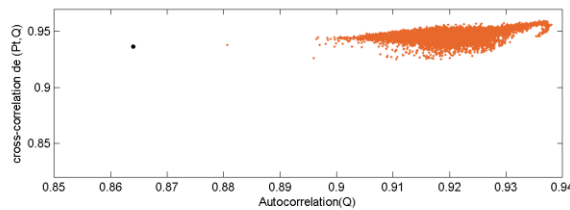
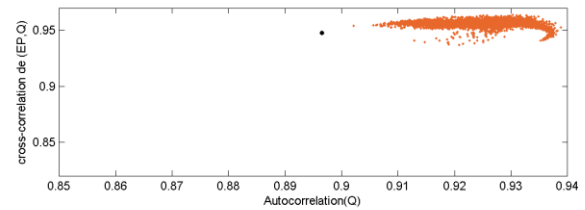
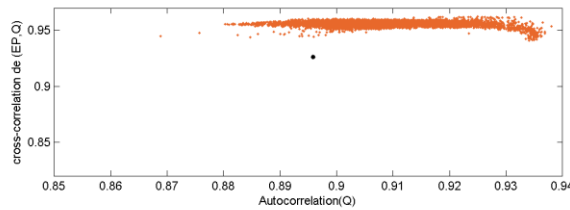
n'apparaît entre la valeur observée et les valeurs simulées. Le modèle GR4J n'est pas en mesure de représenter de manière acceptable les effets des processus hydrologiques dans ces bassins versants.



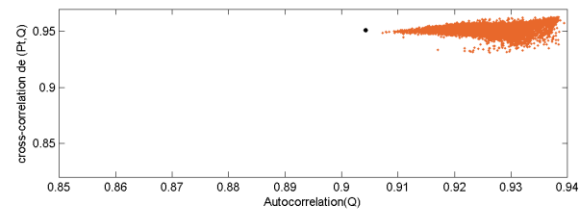
Bassin versant de la Roche



Bassin versant Doncaster



Bassin versant Maskinonge



Bassin versant Saint louis

Figure 4-5 : Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1^{ère} graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, $\rho_{Q,P}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2^{ème} graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit $\rho_{Q,Ep}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q , dans le cas de quatre bassins versants rejetés par le modèle GR4J

Les résultats de validation peuvent être présentés graphiquement de différentes manières. Le tableau 4-1

illustre les caractères physiques des bassins versants adaptés au modèle GR4J. Une liste de 13

caractères physiques a été utilisée dans cette étude. Les caractéristiques physiques les plus utilisées (He Y, 2011) ont été utilisés dans cette étude à l'exception des propriétés du sol, qui n'ont pas été intégrées dans cette étude en raison de la disponibilité limitée de données fiables. Les descripteurs sélectionnés et leurs valeurs Maximales, Minimales et Moyennes sont présentés dans le tableau 4-1.

Tableau 4-1 : Caractéristiques physiques des bassins versants adaptées au modèle GR4J

Modèle hydrologique GR4J				
Caractéristiques des bassins versants		Max	Min	Moyenne
Topographique	Pente (%)	11,6	0,2	4,1
	Aire (km ²)	32468,0	9,1	3011,3
	Altitude (m)	858,3	45,6	351,2
Occupation des sols	Agricole (%)	90,8	0,0	15,9
	Forêt (%)	98,7	0,1	13,9
	Carrière (%)	1,3	0,0	0,1
	Urbain (%)	13,1	0,0	1,4
	Eau (%)	11,4	0,0	3,2
	Milieux humides (%)	17,0	0,0	3,2
Climatique	Latitude (degré)	57,9	45,1	47,2
	Longitude (degré)	-61,7	-78,9	-72,2
	Précipitations annuelles moyennes (mm)	1390,0	675,0	1059,4
	Densité de drainage	2,9	1,0	1,9

Les bassins versants adaptés au modèle hydrologique GR4J sont généralement vastes avec une taille moyenne de 3,011 km². Les autres caractéristiques du bassin, telles que les précipitations annuelles moyennes, sont généralement considérées homogènes sur l'ensemble des bassins.

4.1.2 Modèle hydrologique HBV

Les résultats obtenus par la méthode de la covariance montrent que la structure du modèle hydrologique HBV est adéquate à décrire les échanges hydrologiques dans 33 bassins versants (figure 4-6). Les bassins et leurs régions sont présentés à l'annexe D.

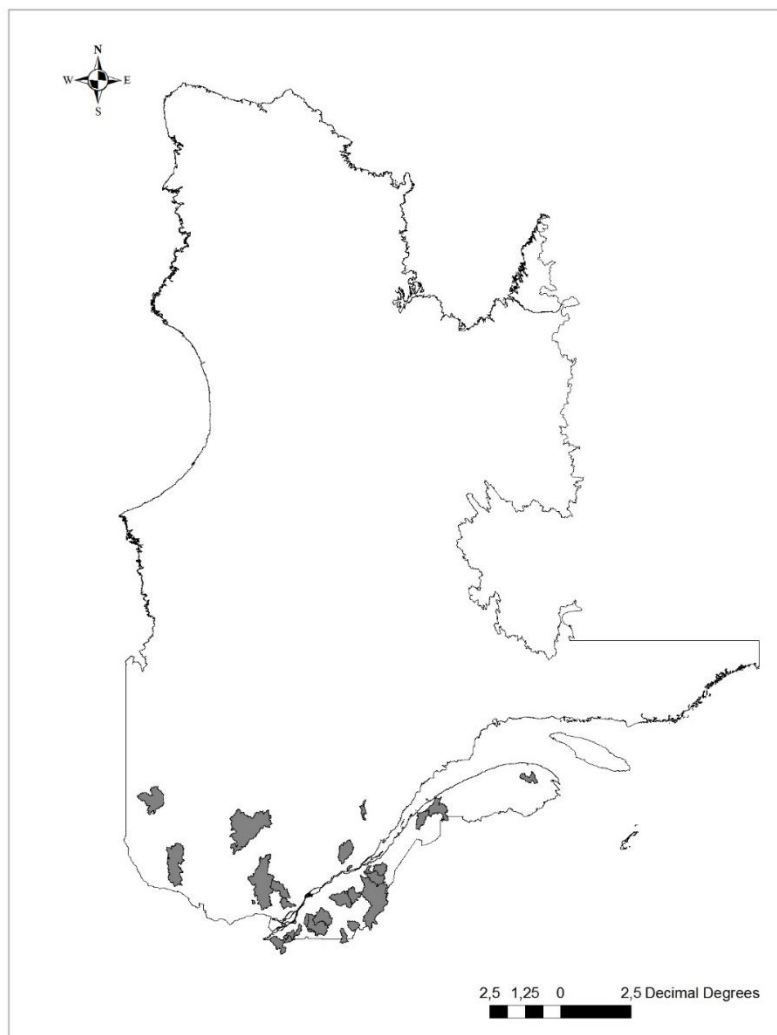
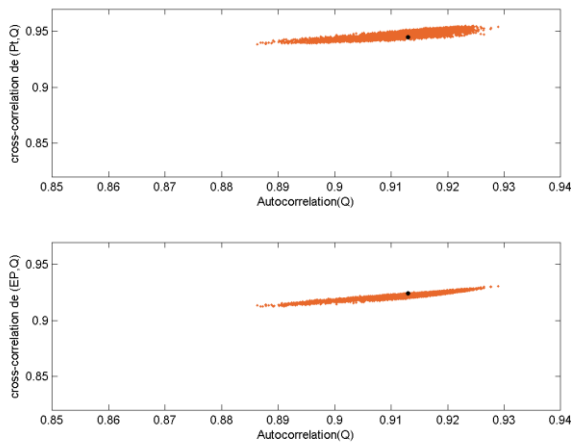


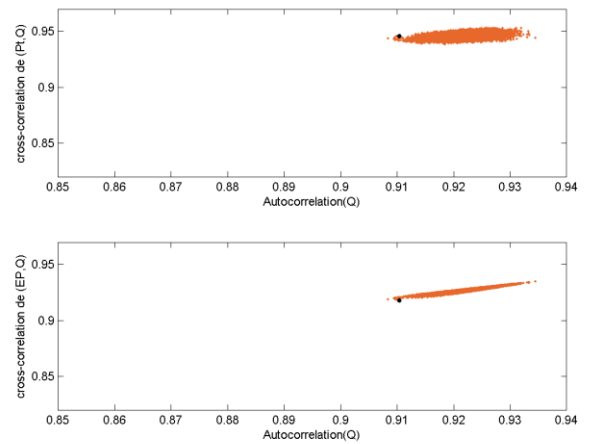
Figure 4-6 : Bassins versants adéquats avec la structure du modèle hydrologique HBV
(Réalisé avec ArcGis)

La figure 4-7 présente les résultats de quatre bassins versants (Bassin versant de l'Acadie, Bassin Versant Nicole, Bassin versant Noire 1, Bassin versant Suffolk).

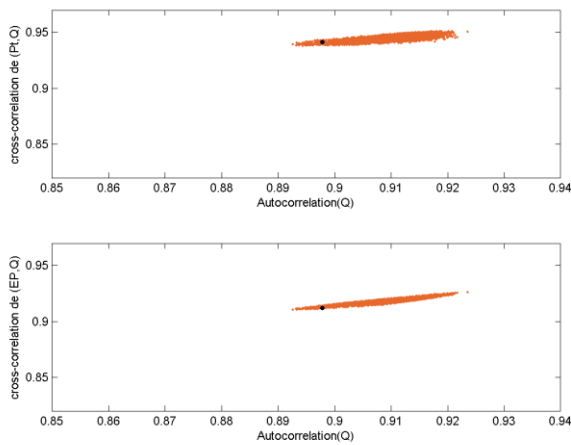
Elle compare la valeur observée de la corrélation croisée du débit avec les précipitations $\rho_{Q,P}$ et avec l'évapotranspiration $\rho_{Q,Ep}$ en fonction de l'autocorrélation ρ_Q , le nuage de points montrant les valeurs simulées par le modèle HBV de la corrélation croisée du débit avec les précipitations $\rho_{Q,P}$ et avec l'évapotranspiration $\rho_{Q,Ep}$ en fonction de l'autocorrélation ρ_Q pour chacun des paramètres. Les résultats des autres bassins sont présentés à l'Annexe H.



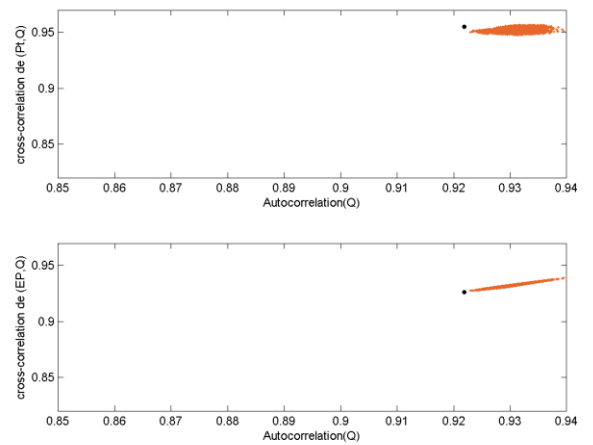
Bassin versant de l'Acadie



Bassin versant Nicolet



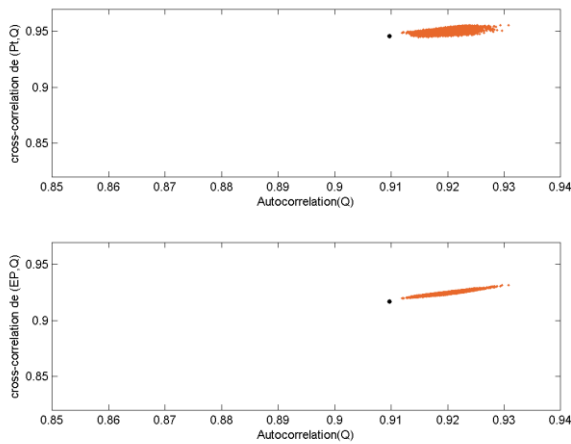
Bassin versant Noire 1



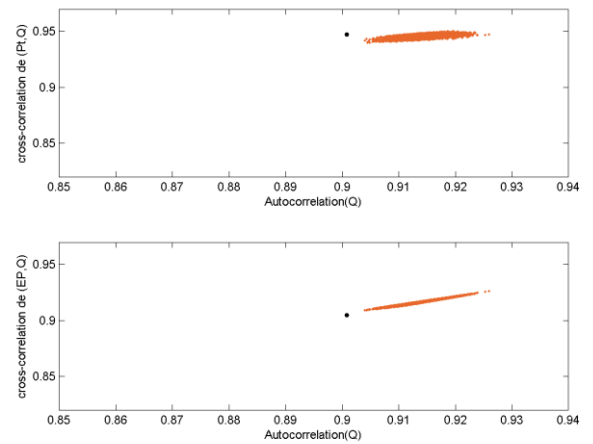
Bassin versant Suffolk

Figure 4-7 Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1^{ère} graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, $\rho_{Q,P}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2^{ème} graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit $\rho_{Q,Ep}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q , dans le cas de quatre bassins versants adaptée au modèle HBV

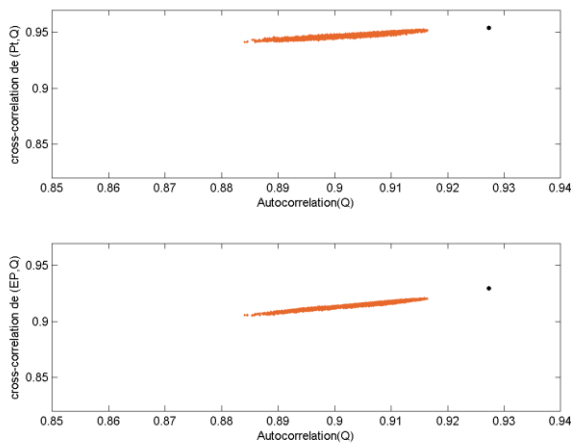
La figure (4-8), montre le cas de quatre bassins versants où le modèle HBV n'est pas en mesure de représenter de manière acceptable les effets des processus hydrologiques. Aucune relation n'apparaît entre la valeur observée et les valeurs simulées.



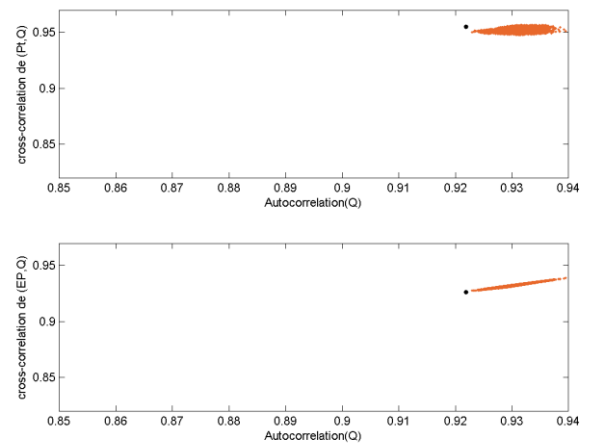
Bassin versant Boyer sud



Bassin versant Dartmouth



Bassin versant Yamaska nord 1



Bassin versant Ouelle

Figure 4-8 : Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1ère graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, $\rho_{Q,P}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2ème graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit $\rho_{Q,Ep}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q , dans le cas de quatre bassins versants rejetés par le modèle HBV

Les descripteurs sélectionnés dans le cas des bassins versants validés par le modèle HBV et leurs valeurs Maximales, Minimales et Moyennes sont présentés dans le tableau 4.2.

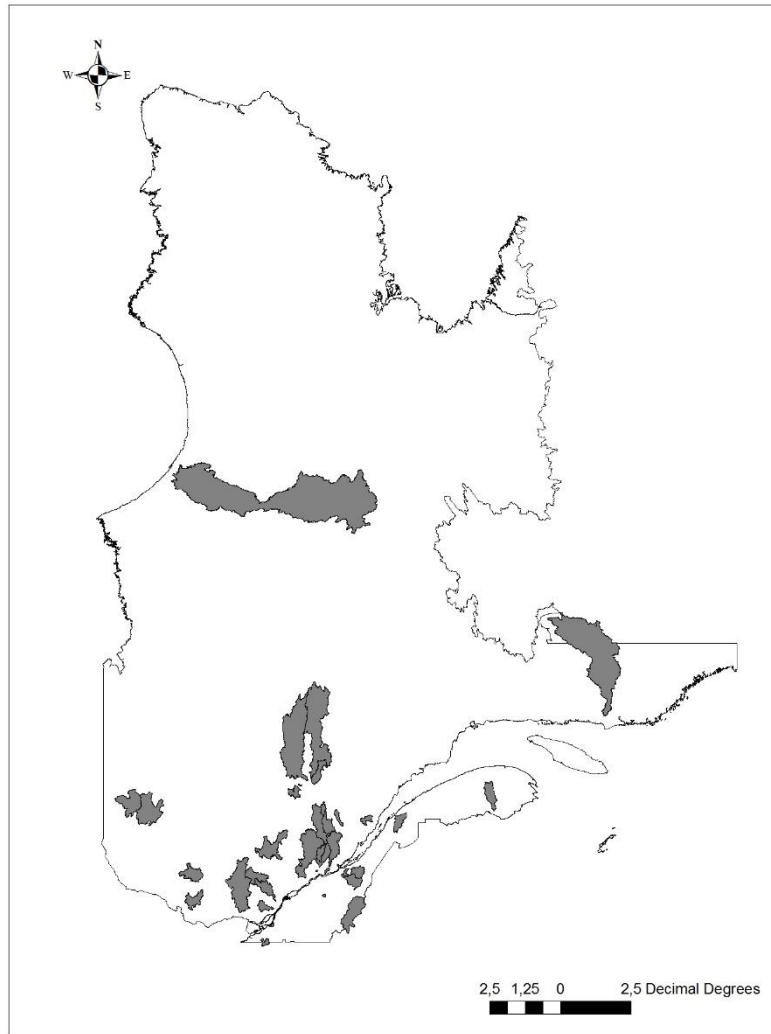
Tableau 4-2 : Caractéristiques physiques des bassins versants adaptée au modèle HBV

Modèle hydrologique HBV				
Caractéristiques du bassin versant		Max	Min	Moyenne
Topographique	Pente (%)	9,3	0,3	17,3
	Aire (km²)	6768,0	31,2	1511,2
	Altitude (m)	734,3	49,1	286,6
Occupation des sols	Agricole (%)	77,3	0,0	25,4
	Forêt (%)	92,3	15,6	65,6
	Carrière (%)	0,8	0,0	0,2
	Urbain (%)	13,1	0,0	2,4
	Eau (%)	11,1	0,0	2,4
	Milieus humides (%)	12,5	0,0	2,3
Climatique	Latitude (degré)	48,4	45,1	46,2
	Longitude (degré)	-69,2	-78,9	-72,9
	Précipitations annuelles moyennes (mm)	1363,0	918,0	1095,6
	Densité de drainage	2,9	1,2	1,8

Les bassins versants adaptés au modèle hydrologique HBV ne sont pas nombreux avec une variété de tailles comprises entre petits et moyens bassins.

4.1.3 Modèle hydrologique MOHYSE

Les résultats obtenus par la méthode de la covariance montrent que la structure du modèle hydrologique MOHYSE est adéquate à décrire les échanges hydrologiques dans 35 bassins versants (figure 4-9). Les bassins et leurs régions sont présentés à l'annexe F.



**Figure 4-9 : Bassins versants adéquats avec la structure du modèle hydrologique MOHYSE
(Réalisé avec ArcGis)**

La figure 4.9 présente les résultats de quatre bassins (Bassin versant de l'Acadie, Bassin Versant Nicole, Bassins versant Noir 1, Bassin versant Suffolk). Il compare la valeur observée de la corrélation croisée du débit avec les précipitations $\rho_{Q,P}$ et avec l'évapotranspiration $\rho_{Q,Ep}$ en fonction de l'autocorrélation ρ_Q , le nuage de points montrant les valeurs simulées par le modèle MOHYSE de la corrélation croisée du débit avec les précipitations $\rho_{Q,P}$ et avec l'évapotranspiration $\rho_{Q,Ep}$ en fonction

de l'autocorrélation ρ_Q pour chacun des paramètres. Les résultats des autres bassins sont présentés à l'annexe I.

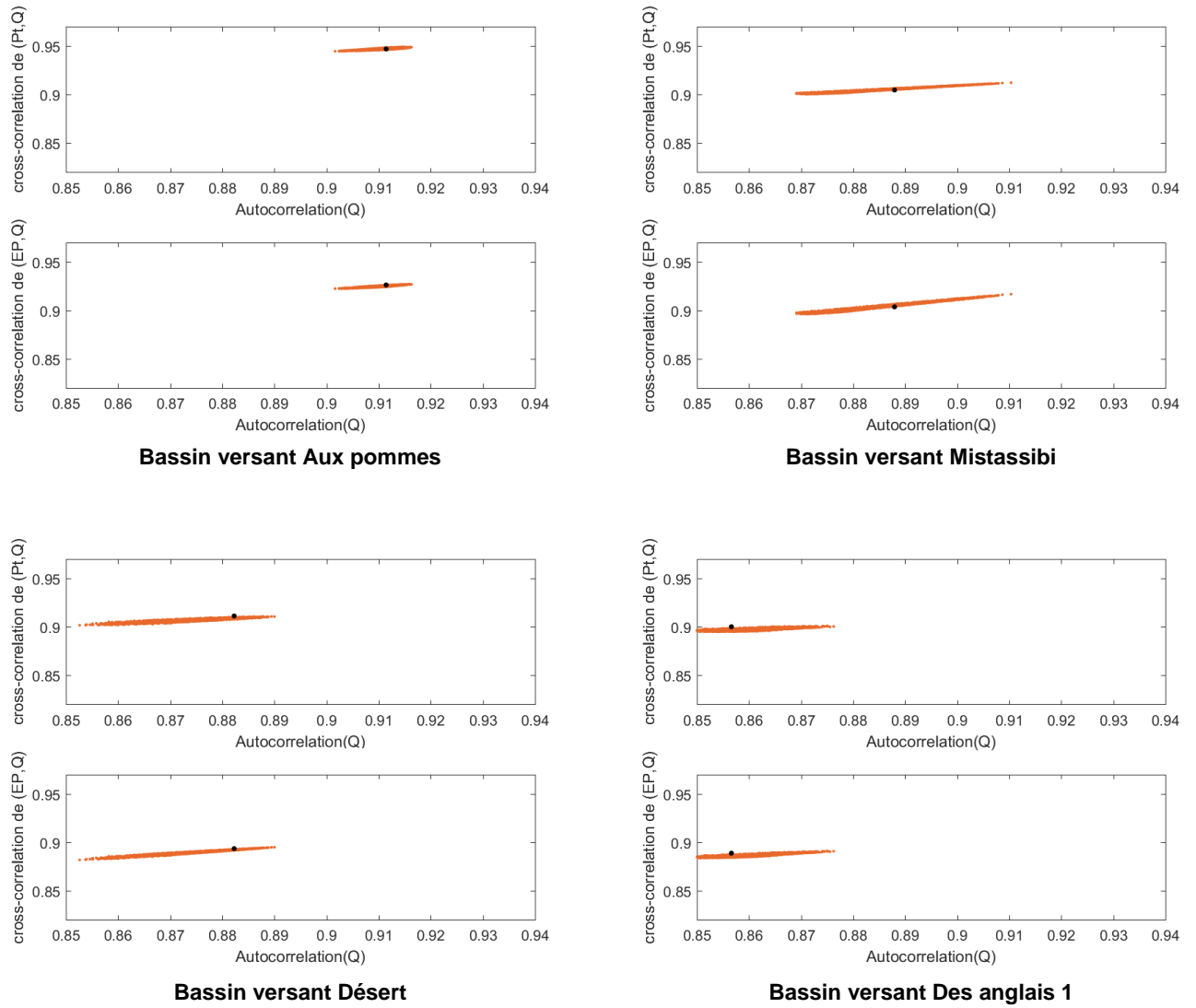


Figure 4-10 : Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1^{ère} graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, $\rho_{Q,P}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2^{ème} graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit $\rho_{Q,EP}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q , dans le cas de quatre bassins versants validés par le modèle MOHYSE

La figure (4-10), montre le cas de quatre bassins versants où aucune relation n'apparaît entre la valeur observée et les valeurs simulées.

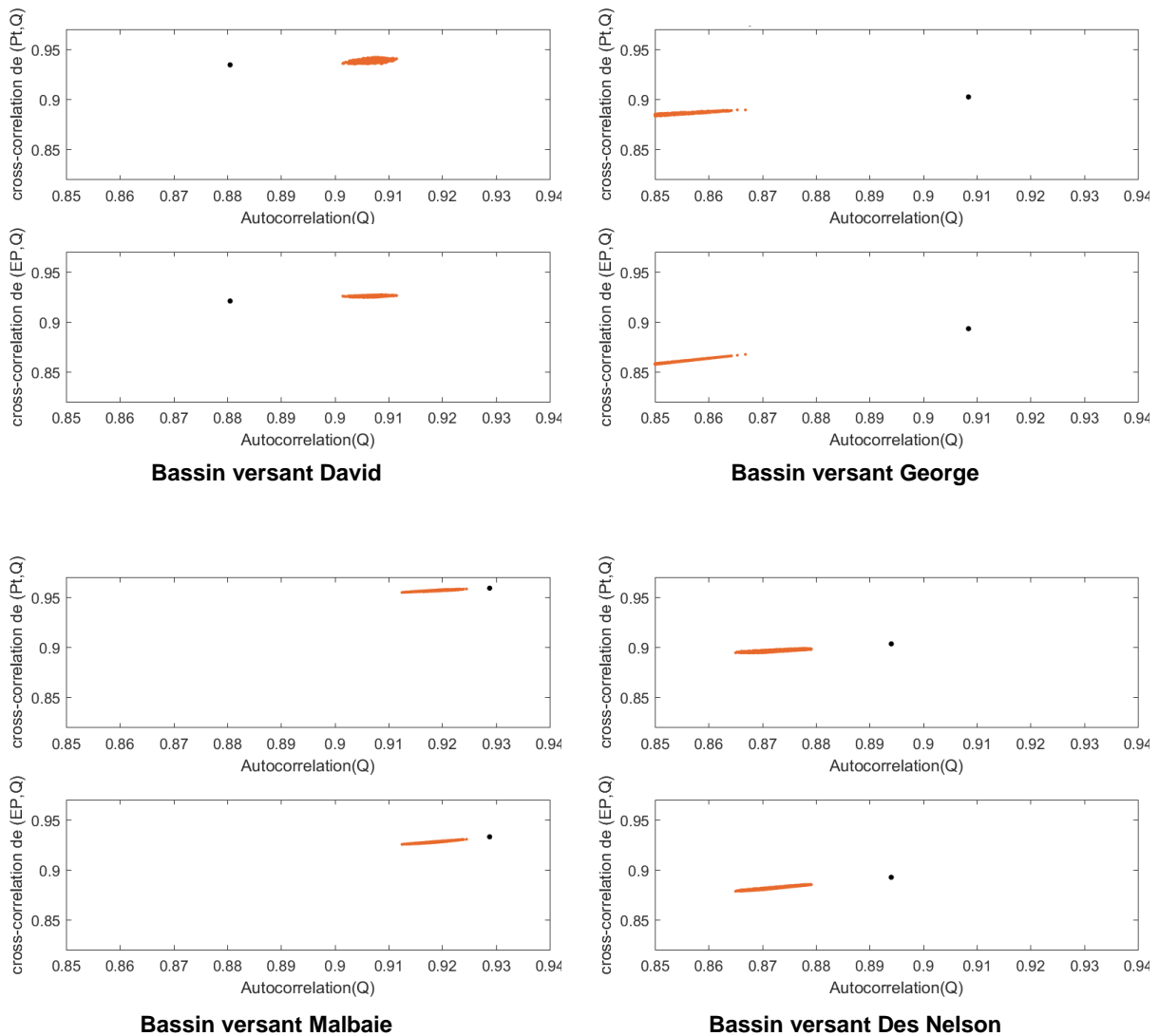


Figure 4-11 Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1^{ère} graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, $\rho_{Q,P}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2^{ème} graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit $\rho_{Q,EP}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q , dans le cas de quatre bassins versants rejetés par le modèle MOHYSE

Les descripteurs sélectionnés des bassins versants validés par le modèle MOHYSE et leurs valeurs Maximales, Minimales et Moyennes sont présentés dans le tableau 4-3.

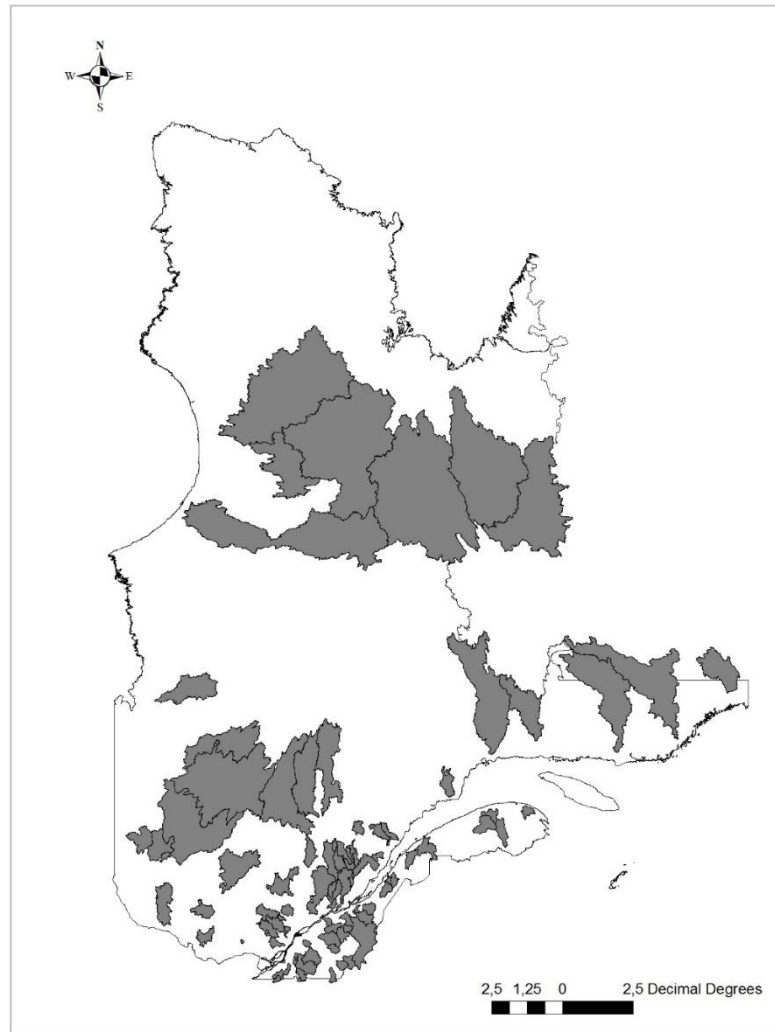
Tableau 4-3 : Caractéristiques physique des bassins versants adaptés au modèle MOHYSE

Modèle hydrologique MOHYSE				
Caractéristiques du bassin versant		Max	Min	Moyenne
Topographique	Pente (%)	11,6	0,9	4,6
	Aire (km²)	9631,0	19,0	1805,0
	Altitude (m)	714,1	102,1	367,0
Occupation des sols	Agricole (%)	64,5	0,0	11,4
	Forêt (%)	98,7	30,4	81,1
	Carrière (%)	1,26	0,0	0,2
	Urbain (%)	6,7	0,0	0,9
	Eau (%)	9,7	0,0	4,0
	Milieus humides (%)	17,0	0,1	4,0
Climatique	Latitude (degré)	55,2	45,1	47,5
	Longitude (degré)	-61,7	-78,9	-72,4
	Précipitations annuelles moyennes (mm)	1363,0	891,0	1073,0
	Densité de drainage	2,8	1,3	2,0

4.1.4 Modèle hydrologique HMETS

Les résultats obtenus par la méthode de la covariance montrent que la structure du modèle hydrologique HBV est adéquate à décrire les échanges hydrologiques dans 104 bassins versants (figure 4-12).

Les bassins et leurs régions sont présentés à l'annexe E.



**Figure 4-12 : Bassins versants adéquats avec la structure du modèle hydrologique HMETS
(Réalisé avec ArcGis)**

La figure 4-12 présente les résultats de quatre bassins (Bassin versant de Ashuapmushuan, Bassin Versant aux broquets, Bassin versant Beauport, Bassin versant A l'ours). Il compare la valeur observée de la corrélation croisée du débit avec les précipitations $\rho_{Q,P}$ et avec l'évapotranspiration $\rho_{Q,Ep}$ en fonction de l'autocorrélation ρ_Q , le nuage de points montrant les valeurs simulées par le

modèle HMETS de la corrélation croisée du débit avec les précipitations $\rho_{Q,P}$ et avec l'évapotranspiration $\rho_{Q,Ep}$ en fonction de l'autocorrélation ρ_Q pour chacun des paramètres. Les résultats des autres bassins sont présentés à l'annexe J.

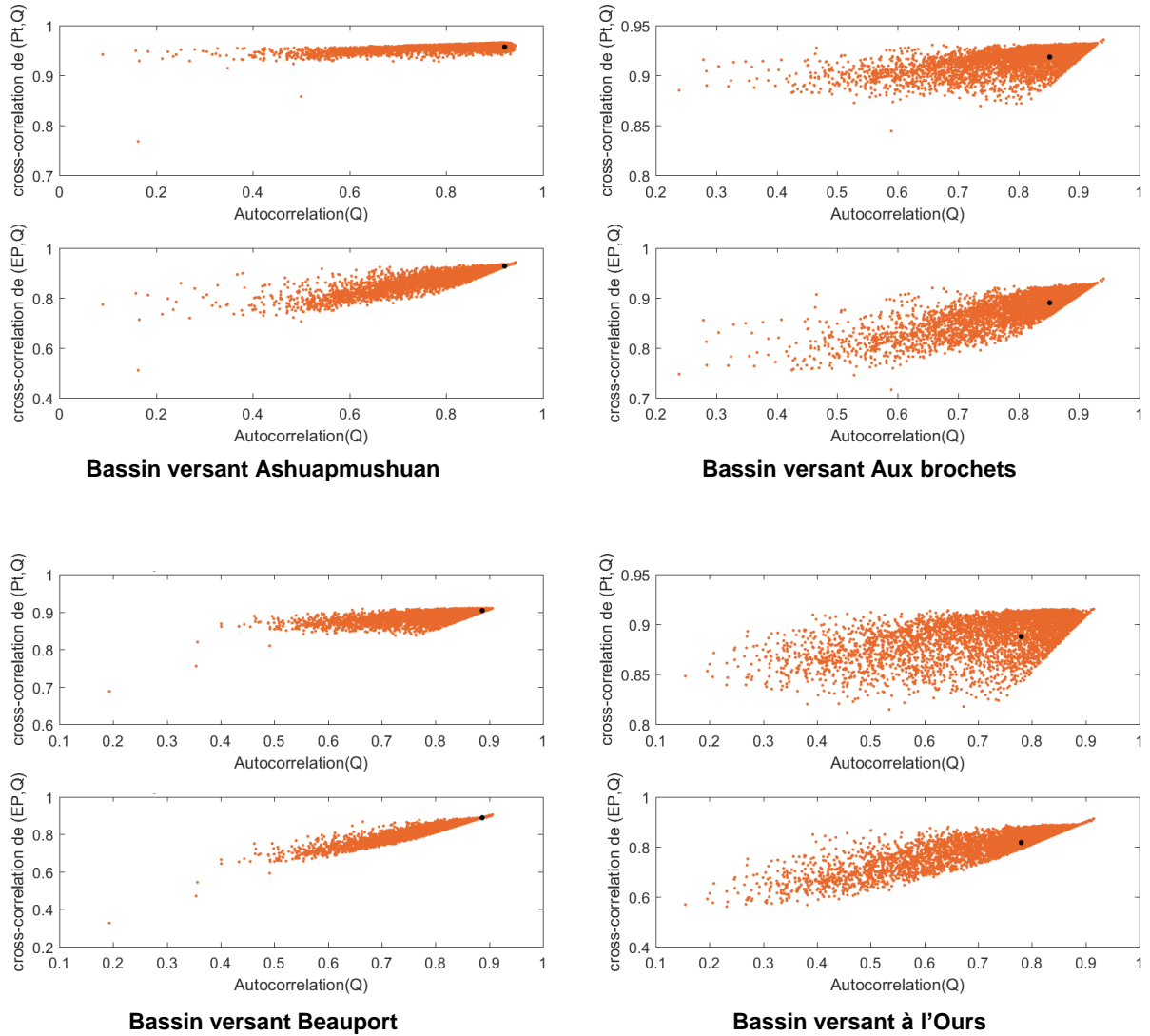


Figure 4-13 : Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1^{ère} graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, $\rho_{Q,P}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2^{ème} graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit $\rho_{Q,Ep}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q , dans le cas de quatre bassins versants adaptés au modèle HMETS

La figure (4-14), montre le cas de quatre bassins versants où aucune relation n'apparaît entre la valeur observée et les valeurs simulées.

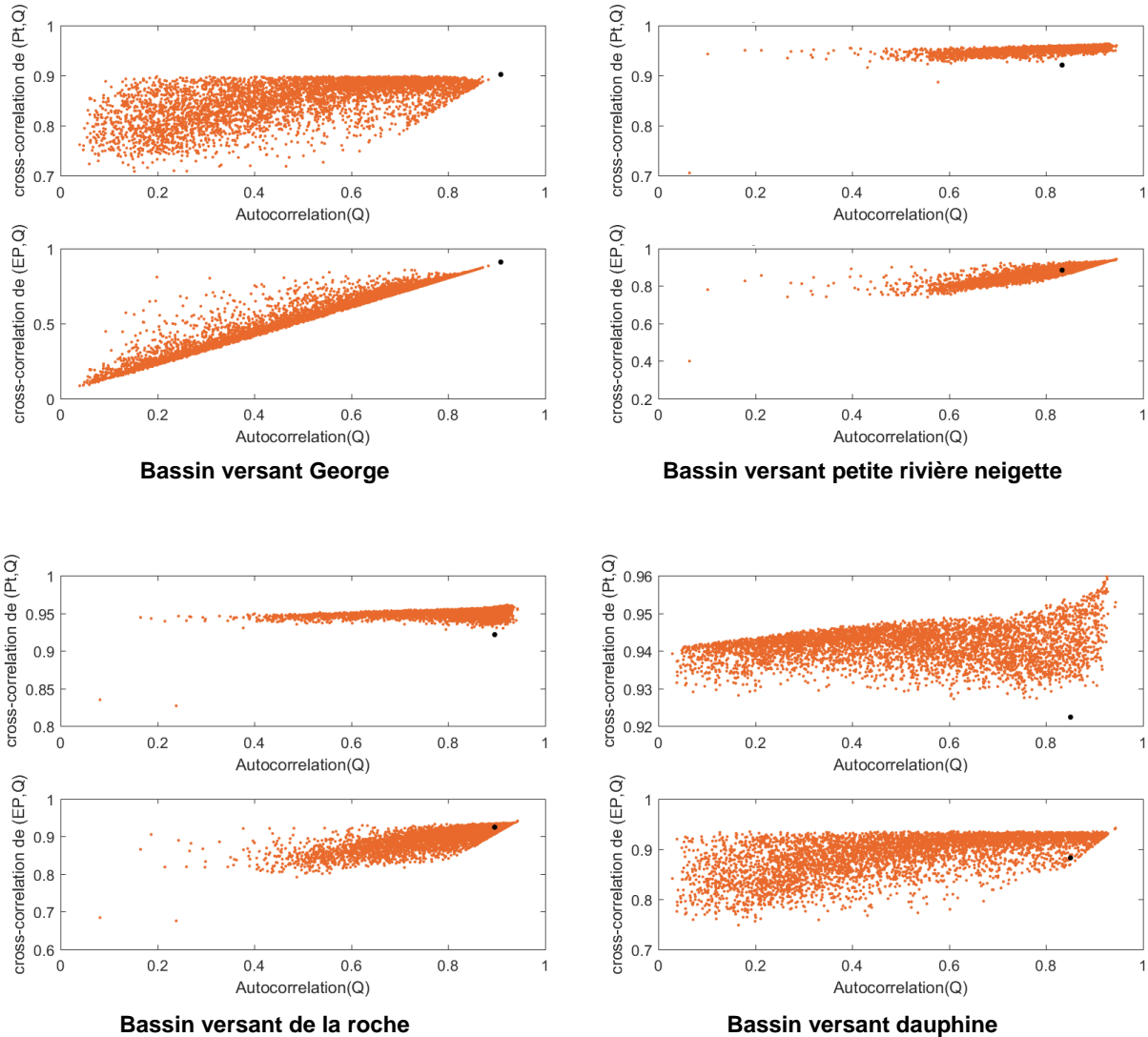


Figure 4-14 Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1^{ère} graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, $\rho_{Q,P}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2^{ème} graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit $\rho_{Q,EP}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q , dans le cas de quatre bassins versants rejetés par le modèle HMETS

Les descripteurs sélectionnés des bassins versants validés par le modèle HMETS et leurs valeurs Maximales, Minimales et Moyennes sont présentés dans le tableau 4.4.

Tableau 4-4 : Caractéristiques physiques des bassins versants adaptée au modèle HMETS

Modèle hydrologique HMETS				
Caractéristiques du bassin versant		Max	Min	Moyenne
Topographique	Pente (%)	12,76	0,25	4,47
	Aire (km ²)	22275,00	1,10	2283,80
	Altitude (m)	858,82	45,62	370,91
Occupation des sols	Agricole (%)	90,82	0,00	15,35
	Forêt (%)	100,00	0,00	13,79
	Carrière (%)	2,26	0,00	0,16
	Urbain (%)	13,08	0,00	1,13
	Eau (%)	11,06	0,00	3,06
	Milieux humides (%)	17,03	0,00	3,27
Climatique	Latitude (degré)	51,53	45,08	47,21
	Longitude (degré)	-59,60	-78,85	-71,67
	Précipitations annuelles moyennes (mm)	1390,00	834,00	1086,43
	Densité de drainage	2,92	0,98	1,85

4.2 Bassins versants validés par les quatre Modèles

Les bassins validés par les quatre modèles sont 13 bassins versants de différentes régions. La plupart des bassins se situe dans la région de Saint-Laurent sud-est. Ce sont des bassins de taille moyenne. La figure (4.15) montre la localisation et l'extension de ces bassins.

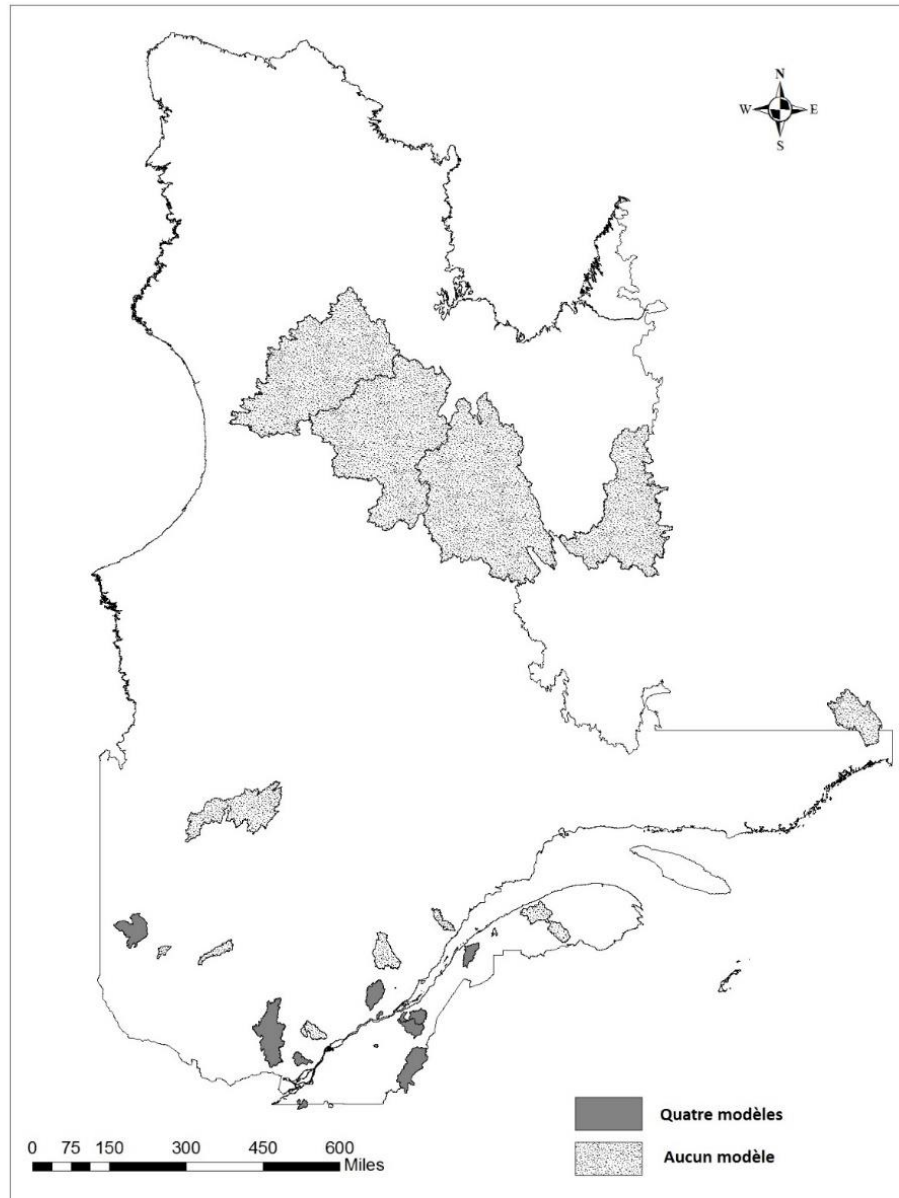


Figure 4-15 : les Bassins versants adéquat avec la structure du quatre modèles et les bassins versants qui ne marche avec aucun modèle (Réalisé avec ArcGis)

Le tableau (4.5) donne les noms et quelques caractéristiques de ces bassins versants.

Tableau 4-5 : Liste des bassins versants adaptés aux quatre modèles

Station	Latitude	Longitude	Aire (km ²)	Région
<u>Bourbon</u>	46,18417	-71,75417	48,1	Region2
<u>Boyer</u>	46,81583	-70,90056	191	Region2
<u>Chaudiere1</u>	46,58694	-71,21361	5820	Region2
<u>Du Sud</u>	46,82000	-70,75611	821	Region2
<u>Etchemin</u>	46,69139	-71,06806	1152	Region2
<u>Trois Pistoles</u>	48,08917	-69,19528	930	Region2
<u>Des Anglais1</u>	45,10028	-73,76250	246	Region3
<u>Noire2</u>	45,07667	-73,85000	46,5	Region3
<u>Kinojevis</u>	48,36583	-78,85444	2594	Region4
<u>Rouge1</u>	45,73833	-74,68917	5479	Region4
<u>Aux Pommes</u>	46,69639	-71,68778	97,8	Region5
<u>De L Achigan</u>	45,84611	-73,49250	641	Region5
<u>Sainte Anne2</u>	46,85250	-71,87472	1546	Region5

On a choisi le cas du bassin versant Aux pommes pour comparer les résultats des quatre modèles. La figure 4-16 montre les résultats obtenus par l'application de la méthode de la covariance sur le bassin versant Aux pommes pour les différents modèles hydrologiques utilisés.

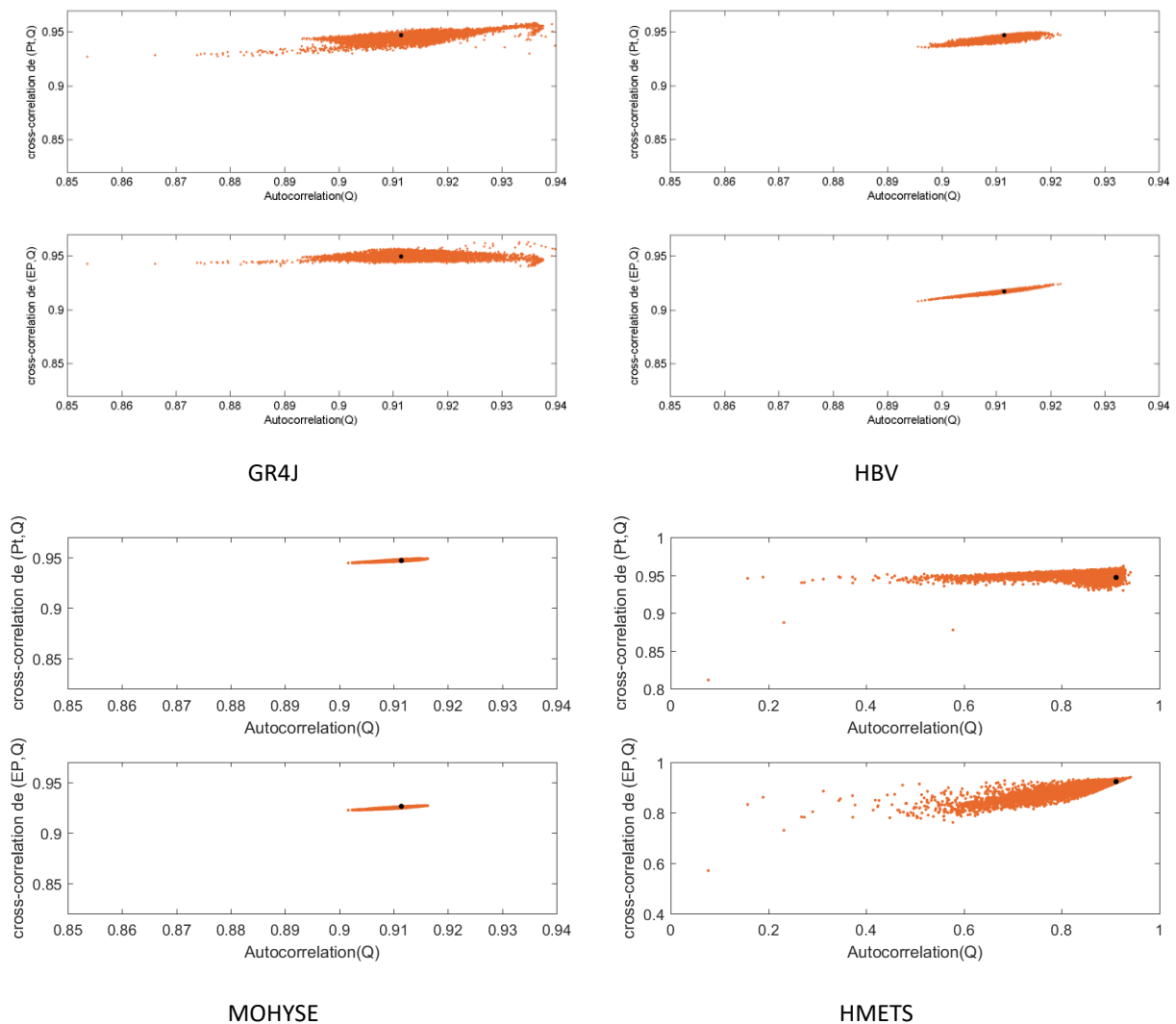


Figure 4-16 : Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1^{ère} graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, $\rho_{Q,P}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2^{ème} graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit $\rho_{Q,Ep}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q , le cas du bassin versant aux pommes pour les quatre modèles

Sur la figure 4-16, on peut voir que le nuage de points oranges qui représente les différentes valeurs simulées change de forme et d'espace occupé en fonction du modèle utilisé. Les modèles GR4J et HMETS donnent un nuage plus large que les deux modèles MOHYSE et HBV, ce qui peut

être expliqué par la capacité des deux modèles GR4J et HMETs à décrire les échanges hydrologiques dans ces bassins.

L'étude a été réalisée avec quatre modèles globaux et conceptuels dont les nombres de paramètres sont différents. En examinant la capacité des modèles à décrire les échanges hydrologiques dans ces bassins, il apparaît que le nombre de paramètres très différent entre les modèles HBV, HMETs, MOHYSE et GR4J joue un rôle significatif. Le modèle GR4J, qui est ajusté à l'aide de seulement six paramètres, semble être trop parcimonieux pour le secteur étudié puisque les performances globales en termes du nombre de bassins versants capable à être décrit avec ce modèle est plus élevé qu'avec les modèles HBV, HMETs ou MOHYSE. Il est possible de croire qu'un nombre de paramètres plus grand dans les autres modèles augmente l'équifinalité possible dans le nombre de jeux de paramètres puisqu'un seul paramètre supplémentaire ajoute un grand nombre de possibilités de jeux de paramètres qui obtiendraient des performances similaires. Ces résultats concordent cependant avec ceux de **(Oudin, Vazken , Charles, Claude, & Nicolas , 2008)** qui avaient trouvé que les modèles simples performaient mieux que les modèles complexes. Un bon modèle hydrologique est défini par sa facilité à trouver des relations entre les paramètres du modèle et les caractéristiques physiques des bassins versants.

4.3 Bassins versants ne pouvant pas être modélisés

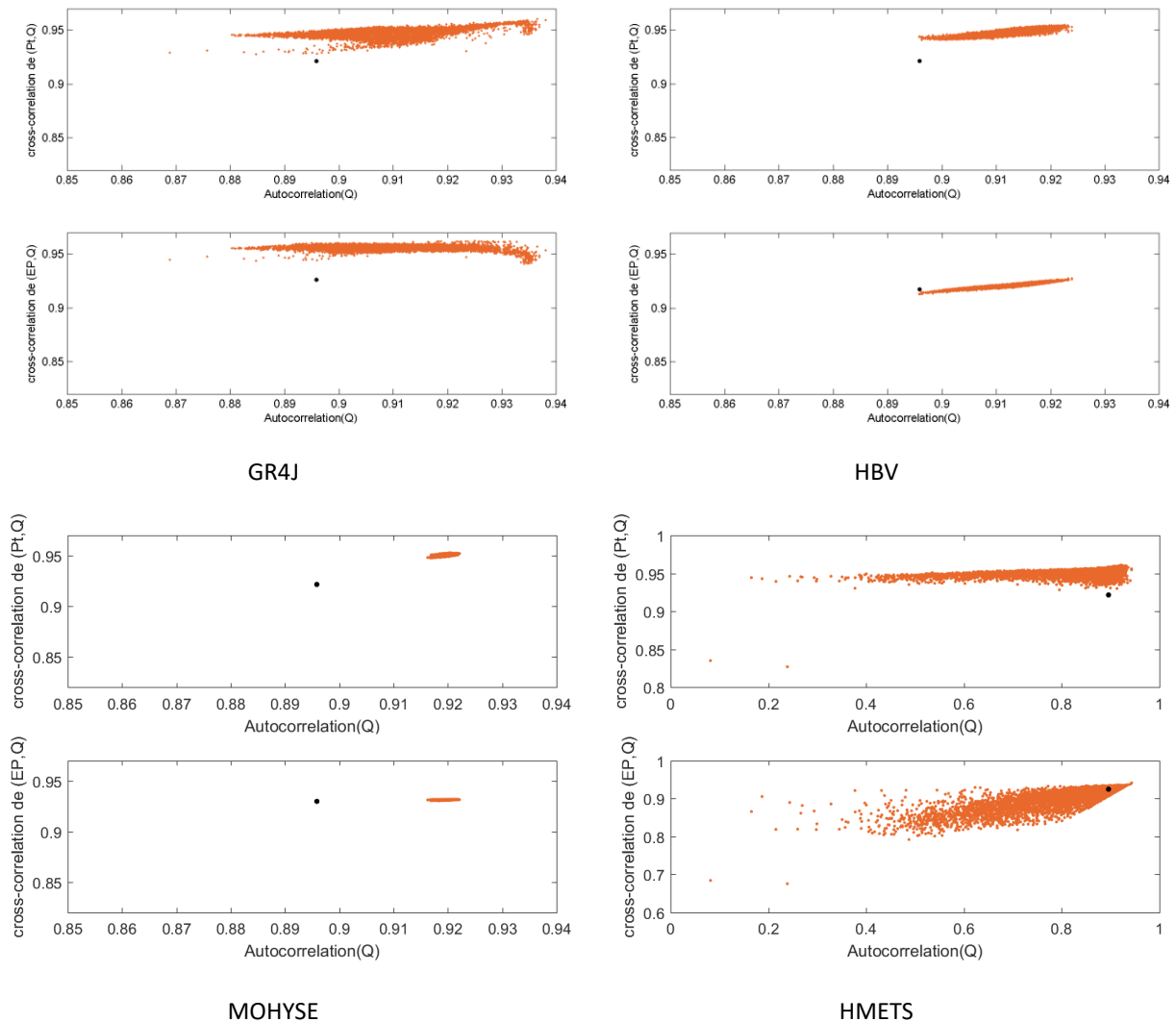


Figure 4-17 : Comparaison des valeurs simulées et observées entre (1^{ère} graphique) la corrélation croisée des précipitations annuelles et du débit, $\rho_{Q,P}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q et (2^{ème} graphique) la corrélation croisée de l'évapotranspiration potentielle annuelle et du débit $\rho_{Q,EP}$ et l'autocorrélation du débit ρ_Q , le cas du bassin versant De la roche pour les quatre modèles

À la figure 4-17, on peut voir que le nuage de points orange qui représente les différentes valeurs simulées n'arrive pas à inclure les valeurs observées. Les quatre modèles n'arrivent pas à décrire le processus hydrologique dans le bassin versant de la roche. Le tableau 4-6 donne les noms, les régions et quelques caractéristiques des bassins versants que les quatre modèles n'arrivent pas à décrire.

Tableau 4-6 : Liste des bassins versants rejetés par les quatre modèles

Station	Latitude	Longitude	Aire (km ²)	Région
<u>Aux Feuilles</u>	58,28444	-71,32500	33700	Region10
<u>Aux Melezes</u>	57,67972	-69,61722	40429	Region10
<u>Bourlamaque</u>	48,08944	-77,67028	365	Region8
<u>Broadback</u>	50,74583	-76,38722	9855	Region8
<u>Caniapiscau</u>	57,41694	-69,24556	48903	Region10
<u>Capitachouane</u>	47,72889	-76,71472	1090	Region4
<u>Dauphine</u>	46,96667	-70,85583	26,6	Region12
<u>De La Roche</u>	45,02194	-73,01611	72,6	Region3
<u>Des Aulnaies1</u>	47,29000	-71,16194	1,1	Region5
<u>Des Aulnaies2</u>	47,27194	-71,15972	3,7	Region5
<u>Des Eaux Volees2</u>	47,27167	-71,16222	3,8	Region5
<u>Des Hurons2</u>	47,00278	-71,36167	75,5	Region5
<u>Doncaster</u>	46,09639	-74,12111	106	Region4
<u>Du Petit Mecatina</u>	50,68083	-59,60194	19191	Region7
<u>Escoumins</u>	48,37139	-69,47361	768	Region7
<u>George</u>	56,78306	-64,86806	24098	Region10
<u>Magpie</u>	50,68556	-64,57861	7201	Region7
<u>Maskinonge</u>	46,30111	-73,09611	1017	Region5
<u>Matane</u>	48,77361	-67,54028	1655	Region2
<u>Matapedia</u>	48,10778	-67,13028	2753	Region1
<u>Moisie</u>	50,35250	-66,18667	19012	Region7
<u>Montmorency2</u>	46,89583	-71,15222	1107	Region5
<u>Nelson</u>	46,86833	-71,42500	58,4	Region5
<u>Noire3</u>	46,34056	-73,65417	188	Region5
<u>Nouvelle</u>	48,15889	-66,34889	1139	Region1
<u>Petite Riviere Neigette</u>	48,41972	-68,35611	98,6	Region2
<u>Pikauba2</u>	48,30528	-71,44083	2639	Region6
<u>Rouge2</u>	48,80389	-72,49194	26,8	Region6
<u>Saint Louis</u>	46,37389	-74,50472	40,0	Region4
<u>Saint Paul</u>	51,77083	-57,60111	5504	Region7
<u>Sainte Anne1</u>	49,04361	-66,47583	772	Region2
<u>Sainte Marguerite Nord Est</u>	48,26806	-69,90917	1097	Region6

Chaque modèle hydrologique simule le processus complexe du cycle de l'eau d'une certaine manière. Dans l'optique d'obtenir des simulations représentatives de ce qui est observé, ainsi que de

faire un choix judicieux des modèles à utiliser, la qualification de la performance des modèles est une étape essentielle.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

On a examiné dans ce projet, les questions qui se posent sur l'utilisation des modèles hydrologiques conceptuels selon leurs structures pour décrire les échanges sur un bassin versant particulier. On a considéré que la compatibilité entre la structure du modèle et les données du bassin versant permettra d'identifier la structure du modèle susceptible de reproduire les différents processus hydrologiques entre plusieurs modèles mis en concurrence.

Cette approche est considérée plus appropriée que de modifier le modèle hydrologique à travers ces paramètres pour mieux l'adapter aux données. Il n'existe toujours pas de méthode ou de critère quantitatif définitif permettant de rejeter un modèle de bassin versant. L'approche de validation décrite ici offre une méthodologie quantitative permettant d'accepter ou de rejeter un modèle de bassin versant. Cette étude a vérifié les résultats associés à l'application de la méthode de la covariance sur les quatre modèles hydrologiques (GR4J, HBV, MOHYSE, HMETs) pour 125 bassins versants pour explorer la capacité des quatre modèles hydrologiques à reproduire les caractéristiques statistiques clés associées aux données d'entrée et de sortie qui seront utilisées pour calibrer les modèles.

Nos résultats montrent que la structure des modèles GR4J et HMETs sont les plus appropriés. Les deux modèles ont pu établir une relation entre un ensemble de données simulées obtenues par la méthode de Monte-Carlo et l'observation pour tous les bassins, alors que les modèles hydrologiques MOHYSE et HBV n'ont pas pu établir cette relation pour la majorité des bassins versants étudiés. Les résultats obtenus confirment juste les deux premières hypothèses émises.

1- Certaines structures de modèles sont plus appropriées à certains bassins qu'à d'autres, tout dépendant de leurs caractéristiques ;

2- La méthode de validation des structures de modèles (méthode de la covariance) est applicable au Québec et pour des modèles de complexité variable ;

3- Un bon ajustement traditionnel entre observations et prévisions est une condition nécessaire, mais non suffisante, pour accepter une hypothèse de modèle de bassin versant.

Cette méthode de validation proposée peut être mise en œuvre numériquement pour toute classe de modèles hydrologiques, déterministes ou stochastiques. Les modèles déterministes et stochastiques contiennent des termes d'erreur de modèle inévitables en plus des termes déterministes. Un objectif important de cette étude est de voir la calibration et la validation des modèles hydrologiques de bassins versants comme des problèmes statistiques classiques d'estimation de paramètres et de test d'hypothèses, respectivement.

Les hydrologues calibrent régulièrement leurs modèles avant la validation. L'acceptation ou le rejet d'un modèle hydrologique (validation du modèle) devrait être fondé sur un test de qualité de l'ajustement. C'est seulement après cette étape que l'on devrait commencer l'estimation des paramètres du modèle (Calibration) comme dernière étape de l'exercice de construction du modèle.

Bien que cette approche se concentre initialement sur la capacité du modèle à reproduire les covariances entre les données d'entrée (les précipitations, l'évapotranspiration potentielle) et de sortie (le débit Q), elle peut facilement être adaptée pour tenir compte de la capacité d'un modèle à reproduire des statistiques qui ne sont pas des covariances telles que les débits de crue, les faibles débits, ou autres statistiques importantes pour une application de modèle particulière.

Dans cette étude initiale, nous avons évalué les modèles de bassins hydrographiques à l'échelle annuelle afin de minimiser le nombre de graphiques. En pratique, on peut souhaiter évaluer la capacité d'un modèle à reproduire la structure de covariance observée à des échelles de temps plus courtes. Un autre défi sera l'élaboration de stratégies d'échantillonnage appropriées pour l'espace paramétrique associé aux modèles de bassins versants répartis. D'autres défis peuvent être l'objectif des futurs travaux, on peut citer :

Le développement des méthodes pour identifier le processus dominant qui contrôle la réponse hydrologique d'un bassin versant pour adapter des modèles basés sur ce facteur dominant et la compréhension des raisons réelles expliquant qu'un modèle pourrait représenter un bassin versant moins bien qu'un autre modèle.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Aghakouchak, A., & Habib, E. (2010). Application of a Conceptual Hydrologic Model in Teaching Hydrologic Processes.
- Aghakouchak, A., & Habib, E. (2010). Application of conceptual hydrologic model in teaching hydrologic processes. *International journal of engineering education*.
- Allen, R., Smith, M., Raes, D., & Pereira, L. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. Rome: Food and agriculture organisation of the united nations.
- Ambroise, B. (1998). Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré. 2 : modélisation systémique et dynamique.
- Bergstrom, S. (1976). Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments.
- Beven, K. (1989). Changing ideas in hydrology — The case of physically-based models. *Journal of Hydrology*.
- Beven, K., & Binley, A. (1992). The future of distributed models: Model calibration and predictive uncertainty.
- Beven, K., & Freer, J. (2001). Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modeling of complex environmental systems using the GLUE methodology.
- Boughton, W., & Droop, O. (2003). Continuous simulation for design flood estimation--a review. *Environmental Modelling & Software*.
- Clarke, R. (1973). A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use.
- Connor, R., Uhlenbrook, S., & Koncagul, E. (2019). *Rapport mondial des nations unies sur la mise en valeur des ressources en eau*. wwap.

- D. N. Moriasi, J. G. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.
- Duan, Q. S. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models.
- Duan, Q., Gupta, V., & Sorooshian, S. (1993). Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization.
- Fortin, J., & Turcotte, R. (2007). *Le modèle hydrologique MOHYSE, bases théoriques et manuel de l'utilisateur*. Montréal: Département des sciences de la terre et de l'atmosphère, université du Québec à Montréal.
- Fortin, V., & Turcotte, R. (2007). *Le modèle hydrologique MOHYSE (bases théoriques et manuel de l'utilisateur)*. Université du Québec à Montréal.
- He Y, B. A. (2011). A review of regionalisation for continuous streamflow simulation.
- Klemeš, V. (1982). Empirical and Causal Models in Hydrology, Scientific Basis of Water- Resource Management.
- Legates, D., Gregory, J., & McCabe, J. (1999). Evaluating the use of goodness of fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*.
- Lindstrom, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., & Bergstrom, S. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of hydrology*.
- Madsen, H. (2003). Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives.
- Martel, J.-L., Demeester, K., & Brissette, F. (2014). HMETs- A simple and efficient model for flow forecasting, climate studies and teaching hydrological modelling. *Canadian water resources journal*.
- Martel, J.-L., Demeester, K., Brissette, F., Poulin, A., & Arsenault, R. (2017). HMETs-A simple and efficient hydrology model for teaching hydrological modelling, flow forecasting and climate change impacts.
- Naghetini, M. (2016). *Fundamentals of statistical hydrology*. Belo Horizonte, Brazil.

- Oudin, L. (2004). *Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global*. These.
- Payraudeau, S. (2002). *Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens - Thèse*. Cemagref-Engref, Engref de Montpellier (France).
- Perrin, C. (2000). *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative*. Grenoble: Institut National polytechnique de grenoble.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of hydrology*.
- Refsgaard, J. a. (1996). Operational validation and intercomparison of different types of. hydrological models.
- Seibert, J. (1997). Estimation of parameter uncertainty in the HBV model. *Nordic Hydrology*.
- Servat, E., & Dezetter, A. (1993). Rainfall-runoff modelling and water resources assessment in northwestern Ivory Coast, Tentative extension to ungauged catchments.
- Singh, V. (1995). Computer Models of Watershed Hydrology.
- Singh, V., & Frevert, D. (2001). *Mathematical Models of Small Watershed Hydrology*. Water Ressources Publications.
- Spear, R. (1997). Large simulation models : calibration, uniqueness and goodness of fit. *Environmental modelling & software*.
- Tolson, B., & Shoemaker, C. (2007). Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration.
- UNESCO, W. a. (2012). *International glossary of hydrology*. WMO No. 385. Geneva: World Meteorological Organization.
- Valery, A. (2010). Modélisation précipitations-débit sous influence nivale élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. *Thèse*.
- Velazquez, J., Anctil, F., Ramos, M., & Perrin, C. (2011). *Can a multimodel approach improve hydrological ensemble forecasting? A study on 29 French catchments using 16 hydrological model structures*. Advances in Geosciences.

Vogel, R., & Sankarasubramanian, A. (2003). the validation of a watershed model without calibration.

Water Resources Research.

Yapo, P., Gupta, H., & Sorooshien, S. (1983). Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models:

the question of parameter observability and uniqueness.

Zehe, E., & Sivapalan, M. (2007). Towards a new generation of hydrological process models for the

meso-scale: an introduction.

**Annexe A : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES QUATRE MODÈLES
HYDROLOGIQUES UTILISÉS**

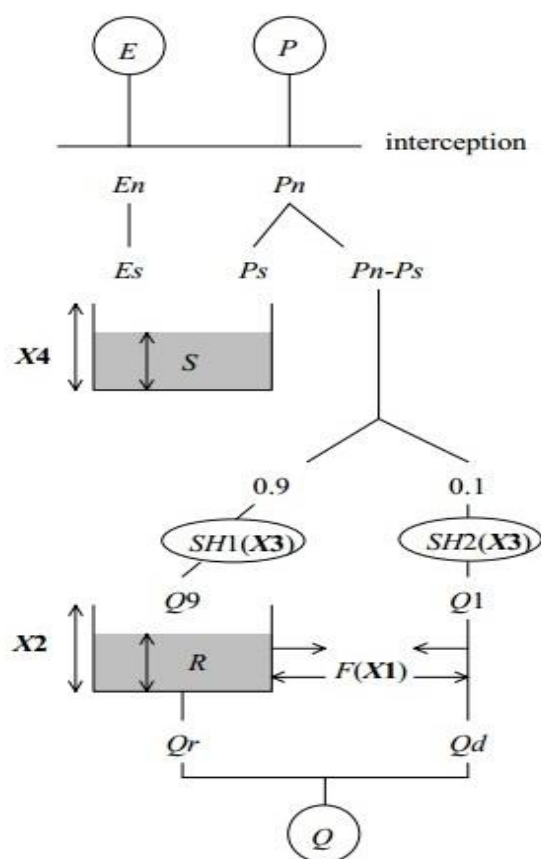


Figure 5- 1 : Structure du modèle GR4J

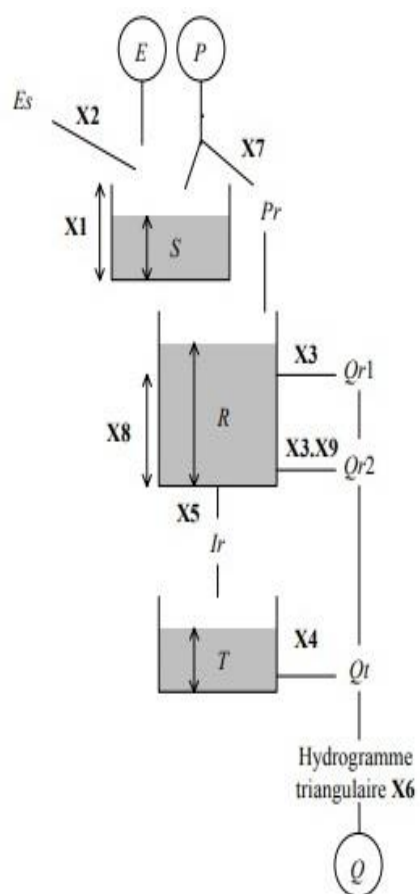


Figure 5-2 : Structure du modèle HBV

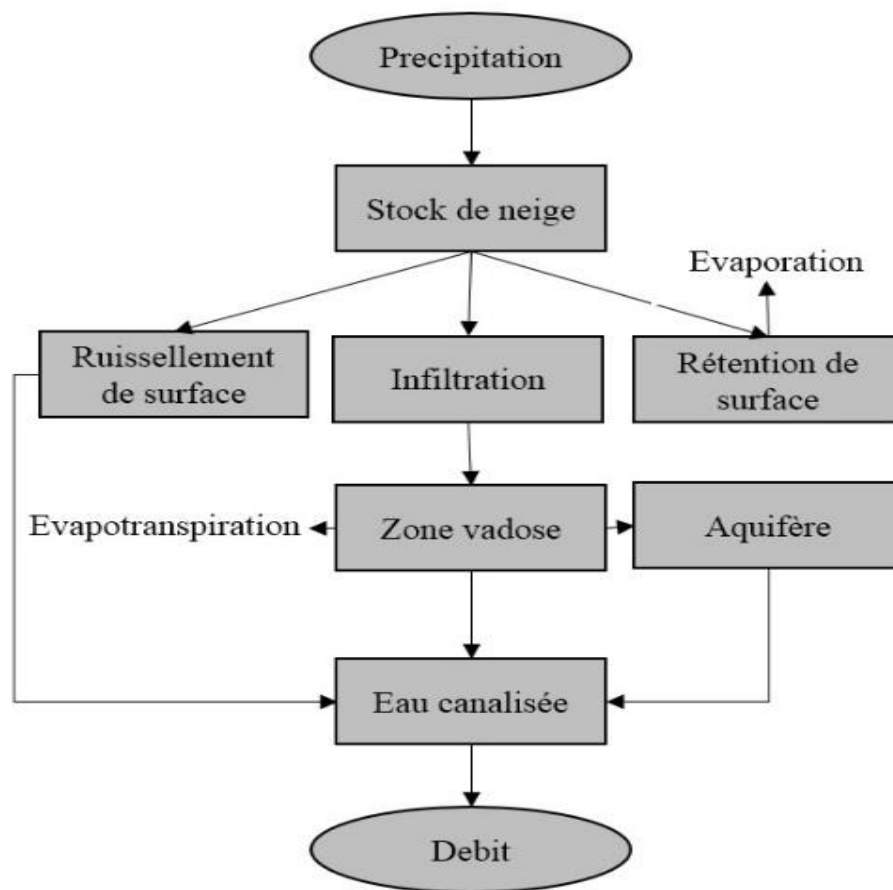


Figure 5- 3 : Structure du modèle MOHYSE

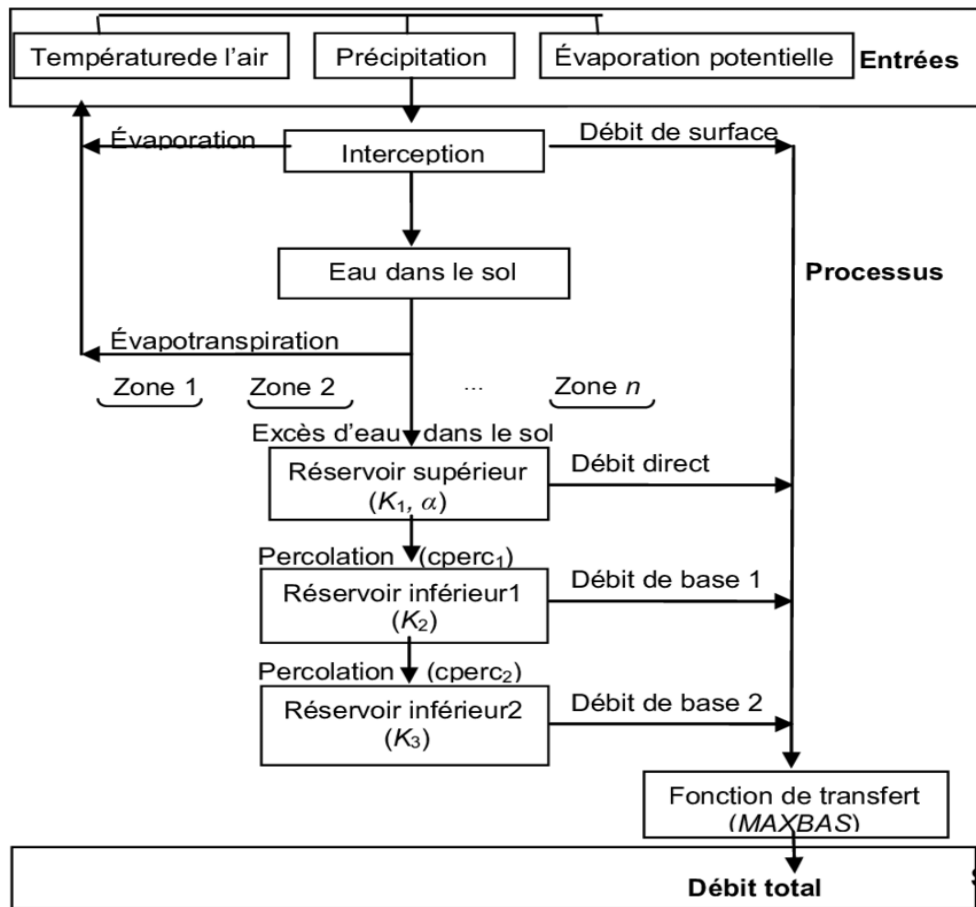


Figure 5- 4 : Structure du modèle HMETS

Annexe B : LISTE DES BASSINS VERSANTS

Station	Latitude	Longitude	Aire (km ²)	Région
<u>Bonaventure</u>	48,18722	-65,55917	1906	Region1
<u>Cascapedia</u>	48,62917	-66,16611	1690	Region1
<u>Matapedia</u>	48,10778	-67,13028	2753	Region1
<u>Nouvelle</u>	48,15889	-66,34889	1139	Region1
<u>Petite Riviere Cascapedia</u>	48,23222	-65,73306	1340	Region1
<u>Beaurivage</u>	46,65694	-71,28889	708	Region2
<u>Becancour1</u>	46,19889	-72,09833	2163	Region2
<u>Becancour2</u>	46,30611	-71,45056	914	Region2
<u>Bourbon</u>	46,18417	-71,75417	48,1	Region2
<u>Boyer</u>	46,81583	-70,90056	191	Region2
<u>Boyer Sud</u>	46,70750	-70,96056	61	Region2
<u>Bras D Henri</u>	46,54028	-71,34000	154	Region2
<u>Chaudiere1</u>	46,58694	-71,21361	5820	Region2
<u>Chaudiere2</u>	46,09639	-70,65444	3085	Region2
<u>Dartmouth</u>	48,97778	-64,69972	626	Region2
<u>Du Loup1</u>	47,61194	-69,64472	515	Region2
<u>Du Sud</u>	46,82000	-70,75611	821	Region2
<u>Etchemin</u>	46,69139	-71,06806	1152	Region2
<u>Famine</u>	46,16694	-70,63917	696	Region2
<u>Kamouraska</u>	47,53278	-69,84944	213	Region2
<u>Matane</u>	48,77361	-67,54028	1655	Region2
<u>Ouelle</u>	47,38111	-69,95389	796	Region2
<u>Petite Riviere Du Chene</u>	46,54056	-72,09333	385	Region2
<u>Petite Riviere Neigette</u>	48,41972	-68,35611	98,6	Region2
<u>Rimouski</u>	48,41278	-68,55500	1615	Region2
<u>Sainte Anne1</u>	49,04361	-66,47583	772	Region2
<u>Trois Pistoles</u>	48,08917	-69,19528	930	Region2
<u>York</u>	48,80694	-64,91667	647	Region2
<u>A L Ours</u>	45,52167	-73,12306	35,1	Region3
<u>Au Saumon</u>	45,58000	-71,38500	769	Region3
<u>Aux Brochets</u>	45,15861	-73,05083	584	Region3
<u>Chateauguay</u>	45,08722	-74,17194	1051	Region3
<u>Coaticook</u>	45,28444	-71,90083	514	Region3
<u>David</u>	45,95417	-72,85972	323	Region3
<u>De La Roche</u>	45,02194	-73,01611	72,6	Region3
<u>Des Anglais1</u>	45,10028	-73,76250	246	Region3
<u>Des Anglais2</u>	45,15806	-73,82472	642	Region3
<u>Des Hurons1</u>	45,49056	-73,18583	308	Region3
<u>Eaton</u>	45,46806	-71,65500	646	Region3
<u>Ewing</u>	45,12528	-73,07722	26,3	Region3
<u>L Acadie</u>	45,39028	-73,37083	367	Region3
<u>Morpions</u>	45,19833	-73,03278	94,1	Region3

<u>Nicolet</u>	46,06028	-72,31306	1550	Region3
<u>Nicolet Sud Ouest</u>	45,79167	-71,96806	562	Region3
<u>Noire1</u>	45,49972	-72,90583	1505	Region3
<u>Noire2</u>	45,07667	-73,85000	46,5	Region3
<u>Yamaska</u>	45,62889	-72,93917	3334	Region3
<u>Yamaska Nord1</u>	45,36028	-72,78028	235	Region3
<u>Yamaska Nord2</u>	45,35028	-72,51528	31,2	Region3
<u>Capitachouane</u>	47,72889	-76,71472	1090	Region4
<u>Desert</u>	46,59000	-76,04139	1646	Region4
<u>Doncaster</u>	46,09639	-74,12111	106	Region4
<u>Dumoine</u>	46,34639	-77,81556	3756	Region4
<u>Gatineau</u>	47,08333	-75,75361	6768	Region4
<u>Kinojevis</u>	48,36583	-78,85444	2594	Region4
<u>Picanoc</u>	46,07806	-76,06944	1277	Region4
<u>Rouge1</u>	45,73833	-74,68917	5479	Region4
<u>Saint Louis</u>	46,37389	-74,50472	40,0	Region4
<u>Suffolk</u>	45,88389	-75,02167	62,6	Region4
<u>Aux Pommes</u>	46,69639	-71,68778	97,8	Region5
<u>Batiscan</u>	46,58556	-72,40472	4504	Region5
<u>Bayonne</u>	46,15722	-73,39083	194	Region5
<u>Beauport</u>	46,86500	-71,20722	23,9	Region5
<u>Bras Du Nord</u>	46,97667	-71,84750	646	Region5
<u>Croche</u>	47,76861	-72,73500	1563	Region5
<u>De L Achigan</u>	45,84611	-73,49250	641	Region5
<u>Des Aulnaies1</u>	47,29000	-71,16194	1,1	Region5
<u>Des Aulnaies2</u>	47,27194	-71,15972	3,7	Region5
<u>Des Eaux Volees1</u>	47,27056	-71,13722	9,1	Region5
<u>Des Eaux Volees2</u>	47,27167	-71,16222	3,8	Region5
<u>Des Hurons2</u>	47,00278	-71,36167	75,5	Region5
<u>Du Loup2</u>	46,60056	-73,18611	769	Region5
<u>Jacques Cartier</u>	46,89250	-71,52611	1997	Region5
<u>La Chevrotiere</u>	46,73722	-72,00083	19,4	Region5
<u>L Assomption</u>	46,01306	-73,42944	1288	Region5
<u>Malbaie</u>	47,69417	-70,21778	1707	Region5
<u>Matawin</u>	46,67722	-73,91500	1387	Region5
<u>Maskinonge</u>	46,30111	-73,09611	1017	Region5
<u>Mastigouche</u>	46,44167	-73,46194	205	Region5
<u>Montmorency1</u>	47,26000	-71,13722	267	Region5
<u>Montmorency2</u>	46,89583	-71,15222	1107	Region5
<u>Nelson</u>	46,86833	-71,42500	58,4	Region5
<u>Noire3</u>	46,34056	-73,65417	188	Region5
<u>Ouareau</u>	46,03083	-73,70500	1263	Region5
<u>Portneuf</u>	46,72778	-71,84111	328	Region5
<u>Sainte Anne2</u>	46,85250	-71,87472	1546	Region5
<u>Vermillon</u>	47,67694	-73,04083	2662	Region5
<u>Ashuapmushuan</u>	48,68556	-72,48778	15515	Region6
<u>Aux Saumons</u>	48,68389	-72,51278	591	Region6

<u>Belle Riviere</u>	48,41194	-71,70361	306	Region6
<u>Cyriac</u>	48,23583	-71,28861	350	Region6
<u>Du Moulin</u>	48,39444	-71,04250	358	Region6
<u>Ecorces</u>	48,18278	-71,64472	1115	Region6
<u>Mars</u>	48,20500	-70,99806	446	Region6
<u>Metabetchouane</u>	48,37556	-71,99667	2212	Region6
<u>Mistassibi</u>	48,94250	-72,17250	8743	Region6
<u>Mistassini</u>	48,88861	-72,27250	9631	Region6
<u>Petit Saguenay</u>	48,09167	-70,02972	433	Region6
<u>Petite Riviere Peribonka</u>	48,81472	-72,04639	1020	Region6
<u>Pikauba1</u>	47,94194	-71,38222	490	Region6
<u>Pikauba2</u>	48,30528	-71,44083	2639	Region6
<u>Rouge2</u>	48,80389	-72,49194	26,8	Region6
<u>Sainte Marguerite Nord Est</u>	48,26806	-69,90917	1097	Region6
<u>Valin</u>	48,48806	-70,97222	768	Region6
<u>Du Petit Mecatina</u>	50,68083	-59,60194	19191	Region7
<u>Escoumins</u>	48,37139	-69,47361	768	Region7
<u>Godbout</u>	49,33083	-67,65472	1577	Region7
<u>Magpie</u>	50,68556	-64,57861	7201	Region7
<u>Moisie</u>	50,35250	-66,18667	19012	Region7
<u>Natashquan</u>	50,42750	-61,71222	15693	Region7
<u>Saint Paul</u>	51,77083	-57,60111	5504	Region7
<u>Bell</u>	49,75472	-77,61694	22275	Region8
<u>Broadback</u>	50,74583	-76,38722	9855	Region8
<u>Bourlamaque</u>	48,08944	-77,67028	365	Region8
<u>Harricana</u>	48,59778	-78,11028	3724	Region8
<u>Pontax</u>	51,53361	-78,09667	5970	Region8
<u>Waswanipi</u>	49,8575	-77,18722	31964	Region8
<u>Grande Riviere De La Baleine</u>	55,23778	-76,98472	32468	Region9
<u>Nastapoca</u>	56,45444	-74,23139	9176	Region9
<u>A La Baleine</u>	57,88861	-67,60000	29878	Region10
<u>Aux Feuilles</u>	58,28444	-71,32500	33700	Region10
<u>Aux Melezes</u>	57,67972	-69,61722	40429	Region10
<u>Caniapiscau</u>	57,41694	-69,24556	48903	Region10
<u>George</u>	56,78306	-64,86806	24098	Region10
<u>Dauphine</u>	46,96667	-70,85583	26,6	Region12

Annexe C : LISTE DES BASSINS VERSANTS VALIDÉS PAR GR4J

Station	Latitude	Longitude	Aire (km²)	Région
<u>Bonaventure</u>	48,18722	-65,55917	1906	1
<u>Petite Riviere Cascapedia</u>	48,23222	-65,73306	1340	1
<u>Becancour1</u>	46,19889	-72,09833	2163	2
<u>Becancour2</u>	46,30611	-71,45056	914	2
<u>Bourbon</u>	46,18417	-71,75417	48,1	2
<u>Boyer</u>	46,81583	-70,90056	191	2
<u>Chaudiere1</u>	46,58694	-71,21361	5820	2
<u>Chaudiere2</u>	46,09639	-70,65444	3085	2
<u>Dartmouth</u>	48,97778	-64,69972	626	2
<u>Du Loup1</u>	47,61194	-69,64472	515	2
<u>Du Sud</u>	46,82	-70,75611	821	2
<u>Etchemin</u>	46,69139	-71,06806	1152	2
<u>Famine</u>	46,16694	-70,63917	696	2
<u>Kamouraska</u>	47,53278	-69,84944	213	2
<u>Ouelle</u>	47,38111	-69,95389	796	2
<u>Petite Riviere Du Chene</u>	46,54056	-72,09333	385	2
<u>Trois Pistoles</u>	48,08917	-69,19528	930	2
<u>York</u>	45,35028	-72,51528	31,2	2
<u>Chateauguay</u>	45,08722	-74,17194	1051	3
<u>Coaticook</u>	45,28444	-71,90083	514	3
<u>David</u>	45,95417	-72,85972	323	3
<u>Des Anglais1</u>	45,10028	-73,7625	246	3
<u>Des Anglais2</u>	45,15806	-73,82472	642	3
<u>Des Hurons1</u>	45,49056	-73,18583	308	3
<u>Eaton</u>	45,46806	-71,655	646	3
<u>Ewing</u>	45,12528	-73,07722	26,3	3
<u>L Acadie</u>	45,39028	-73,37083	367	3
<u>Morpions</u>	46,89583	-71,15222	1107	3
<u>Nicolet</u>	46,06028	-72,31306	1550	3
<u>Nicolet Sud Ouest</u>	45,79167	-71,96806	562	3
<u>Noire1</u>	45,49972	-72,90583	1505	3
<u>Noire2</u>	45,07667	-73,85	46,5	3
<u>Yamaska</u>	45,62889	-72,93917	3334	3
<u>Yamaska Nord2</u>	45,36028	-72,78028	235	3
<u>Desert</u>	46,59	-76,04139	1646	4
<u>Dumoine</u>	46,34639	-77,81556	3756	4
<u>Gatineau</u>	47,08333	-75,75361	6768	4
<u>Kinojevis</u>	48,36583	-78,85444	2594	4
<u>Picanoc</u>	46,07806	-76,06944	1277	4
<u>Rouge1</u>	45,73833	-74,68917	5479	4
<u>Suffolk</u>	45,88389	-75,02167	62,6	4
<u>Aux Pommes</u>	46,69639	-71,68778	97,8	5

<u>Batiscan</u>	46,58556	-72,40472	4504	5
<u>Beauport</u>	46,865	-71,20722	23,9	5
<u>De L Achigan</u>	45,84611	-73,4925	641	5
<u>Des Eaux Volees1</u>	47,27056	-71,13722	9,1	5
<u>Du Loup2</u>	46,60056	-73,18611	769	5
<u>Jacques Cartier</u>	46,8925	-71,52611	1997	5
<u>L Assomption</u>	46,01306	-73,42944	1288	5
<u>La Chevrotiere</u>	46,73722	-72,00083	19,4	5
<u>Malbaie</u>	47,69417	-70,21778	1707	5
<u>Mastigouche</u>	46,30111	-73,09611	1017	5
<u>Matawin</u>	46,67722	-73,915	1387	5
<u>Montmorency1</u>	47,26	-71,13722	267	5
<u>Ouareau</u>	46,03083	-73,705	1263	5
<u>Sainte Anne2</u>	46,8525	-71,87472	1546	5
<u>Vermillon</u>	47,67694	-73,04083	2662	5
<u>Ashuapmushuan</u>	48,68556	-72,48778	15515	6
<u>Aux Saumons</u>	48,68389	-72,51278	591	6
<u>Cyriac</u>	48,23583	-71,28861	350	6
<u>Du Moulin</u>	48,39444	-71,0425	358	6
<u>Mars</u>	48,205	-70,99806	446	6
<u>Mistassini</u>	48,88861	-72,2725	9631	6
<u>Petit Saguenay</u>	48,09167	-70,02972	433	6
<u>Petite Riviere Peribonka</u>	48,81472	-72,04639	1020	6
<u>Pikauba1</u>	47,94194	-71,38222	490	6
<u>Valin</u>	48,48806	-70,97222	768	6
<u>Godbout</u>	49,33083	-67,65472	1577	7
<u>Natashquan</u>	50,4275	-61,71222	15693	7
<u>Harricana</u>	48,59778	-78,11028	3724	8
<u>Pontax</u>	51,53361	-78,09667	5970	8
<u>Waswanipi</u>	49,8575	-77,18722	31964	8
<u>Grande Riviere De La Baleine</u>	55,23778	-76,98472	32468	9
<u>Nastapoca</u>	45,19833	-73,03278	94,1	9
<u>A La Baleine</u>	57,88861	-67,6	29878	10

Annexe D : LISTE DES BASSINS VERSANTS VALIDÉS PAR HBV

Station	Latitude	Longitude	Aire (km²)	Région
Bourbon	46,18417	-71,75417	48,1	2
Chaudiere1	46,58694	-71,21361	5820	2
Trois_Pistoles	48,08917	-69,19528	930	2
Becancour1	46,19889	-72,09833	2163	2
Boyer	46,81583	-70,90056	191	2
Du_Sud	46,82	-70,75611	821	2
Etchemin	46,69139	-71,06806	1152	2
York	45,35028	-72,51528	31,2	2
Chaudiere2	46,09639	-70,65444	3085	2
Des_Hurons1	45,49056	-73,18583	308	3
Morpions	46,89583	-71,15222	1107	3
Eaton	45,46806	-71,655	646	3
Nicolet	46,06028	-72,31306	1550	3
Noire1	45,49972	-72,90583	1505	3
Noire2	45,07667	-73,85	46,5	3
Yamaska	45,62889	-72,93917	3334	3
L_Acadie	45,39028	-73,37083	367	3
Yamaska_Nord2	45,36028	-72,78028	235	3
Chateauguay	45,08722	-74,17194	1051	3
Coaticook	45,28444	-71,90083	514	3
Des_Anglais1	45,10028	-73,7625	246	3
Des_Anglais2	45,15806	-73,82472	642	3
Kinojevis	48,36583	-78,85444	2594	4
Rouge1	45,73833	-74,68917	5479	4
Suffolk	45,88389	-75,02167	62,6	4
Dumoine	46,34639	-77,81556	3756	4
Gatineau	47,08333	-75,75361	6768	4
Aux_Pommes	46,69639	-71,68778	97,8	5
Ouareau	46,03083	-73,705	1263	5
Sainte_Anne2	46,8525	-71,87472	1546	5
De_L_Achigan	45,84611	-73,4925	641	5
Du_Moulin	48,39444	-71,0425	358	6

Annexe E : LISTE DES BASSINS VERSANTS VALIDÉS PAR HMETs

Station	Latitude	Longitude	Aire (km ²)	Région
<u>A L Ours</u>	45,52167	-73,12306	35,1	3
<u>Ashuapmushuan</u>	48,68556	-72,48778	15515	6
<u>Au Saumon</u>	45,58	-71,385	769	3
<u>Aux Brochets</u>	45,15861	-73,05083	584	3
<u>Aux Pommes</u>	46,69639	-71,68778	97,8	5
<u>Aux Saumons</u>	48,68389	-72,51278	591	6
<u>Batiscan</u>	46,58556	-72,40472	4504	5
<u>Bayonne</u>	46,15722	-73,39083	194	5
<u>Beauport</u>	46,865	-71,20722	23,9	5
<u>Beaurivage</u>	46,65694	-71,28889	708	2
<u>Becancour1</u>	46,19889	-72,09833	2163	2
<u>Becancour2</u>	46,30611	-71,45056	914	2
<u>Bell</u>	49,75472	-77,61694	22275	8
<u>Belle Riviere</u>	48,41194	-71,70361	306	6
<u>Bourbon</u>	46,18417	-71,75417	48,1	2
<u>Boyer</u>	46,81583	-70,90056	191	2
<u>Boyer Sud</u>	46,7075	-70,96056	61	2
<u>Bras Du Nord</u>	46,97667	-71,8475	646	5
<u>Cascapedia</u>	48,62917	-66,16611	1690	1
<u>Chaudiere1</u>	46,58694	-71,21361	5820	2
<u>Chaudiere2</u>	46,09639	-70,65444	3085	2
<u>Coaticook</u>	45,28444	-71,90083	514	3
<u>Croche</u>	47,76861	-72,735	1563	5
<u>Cyriac</u>	48,23583	-71,28861	350	6
<u>Dartmouth</u>	48,97778	-64,69972	626	2
<u>David</u>	45,95417	-72,85972	323	3
<u>De L Achigan</u>	45,84611	-73,4925	641	5
<u>Des Anglais1</u>	45,10028	-73,7625	246	3
<u>Des Anglais2</u>	45,15806	-73,82472	642	3
<u>Des Aulnaies1</u>	47,29	-71,16194	1,1	5
<u>Des Eaux Volees1</u>	47,27056	-71,13722	9,1	5
<u>Des Eaux Volees2</u>	47,27167	-71,16222	3,8	5
<u>Des Hurons1</u>	45,49056	-73,18583	308	3
<u>Desert</u>	46,59	-76,04139	1646	4
<u>Doncaster</u>	46,09639	-74,12111	106	4
<u>Du Loup1</u>	47,61194	-69,64472	515	2
<u>Du Loup2</u>	46,60056	-73,18611	769	5
<u>Du Moulin</u>	48,39444	-71,0425	358	6
<u>Du Petit Mecatina</u>	50,68083	-59,60194	19191	7
<u>Du Sud</u>	46,82	-70,75611	821	2

<u>Dumoine</u>	46,34639	-77,81556	3756	4
<u>Eaton</u>	45,46806	-71,655	646	3
<u>Etchemin</u>	46,69139	-71,06806	1152	2
<u>Ewing</u>	45,12528	-73,07722	26,3	3
<u>Famine</u>	46,16694	-70,63917	696	2
<u>Gatineau</u>	47,08333	-75,75361	6768	4
<u>Godbout</u>	49,33083	-67,65472	1577	7
<u>Harricana</u>	48,59778	-78,11028	3724	8
<u>Jacques Cartier</u>	46,8925	-71,52611	1997	5
<u>Kamouraska</u>	47,53278	-69,84944	213	2
<u>Kinojevis</u>	48,36583	-78,85444	2594	4
<u>L Acadie</u>	45,39028	-73,37083	367	3
<u>L Assomption</u>	46,01306	-73,42944	1288	5
<u>La Chevrotiere</u>	46,73722	-72,00083	19,4	5
<u>Magpie</u>	50,68556	-64,57861	7201	7
<u>Malbaie</u>	47,69417	-70,21778	1707	5
<u>Mars</u>	48,205	-70,99806	446	6
<u>Mastigouche</u>	46,30111	-73,09611	1017	5
<u>Matapedia</u>	48,10778	-67,13028	2753	1
<u>Matawin</u>	46,67722	-73,915	1387	5
<u>Metabetchouane</u>	48,37556	-71,99667	2212	6
<u>Mistassini</u>	48,88861	-72,2725	9631	6
<u>Mistassini</u>	48,88861	-72,2725	9631	6
<u>Moisie</u>	50,3525	-66,18667	19012	7
<u>Montmorency1</u>	47,26	-71,13722	267	5
<u>Montmorency2</u>	46,89583	-71,15222	1107	5
<u>Morpions</u>	46,89583	-71,15222	1107	3
<u>Natashquan</u>	50,4275	-61,71222	15693	7
<u>Nelson</u>	46,86833	-71,425	58,4	5
<u>Nicolet</u>	46,06028	-72,31306	1550	3
<u>Nicolet Sud Ouest</u>	45,79167	-71,96806	562	3
<u>Noire1</u>	45,49972	-72,90583	1505	3
<u>Noire2</u>	45,07667	-73,85	46,5	3
<u>Ouareau</u>	46,03083	-73,705	1263	5
<u>Ouelle</u>	47,38111	-69,95389	796	2
<u>Petit Saguenay</u>	48,09167	-70,02972	433	6
<u>Petite Riviere Cascapedia</u>	48,23222	-65,73306	1340	1
<u>Petite Riviere Du Chene</u>	46,54056	-72,09333	385	2
<u>Petite Riviere Peribonka</u>	48,81472	-72,04639	1020	6
<u>Picanoc</u>	46,07806	-76,06944	1277	4
<u>Pikauba1</u>	47,94194	-71,38222	490	6
<u>Pontax</u>	51,53361	-78,09667	5970	8
<u>Portneuf</u>	46,72778	-71,84111	328	5
<u>Rimouski</u>	48,41278	-68,555	1615	2
<u>Rouge2</u>	48,80389	-72,49194	26,8	6
<u>Saint Louis</u>	46,37389	-74,50472	40	4
<u>Sainte Anne1</u>	49,04361	-66,47583	772	2

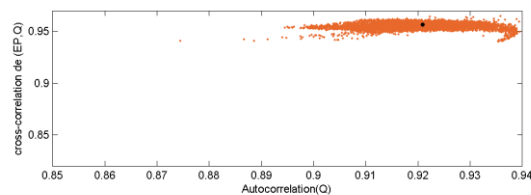
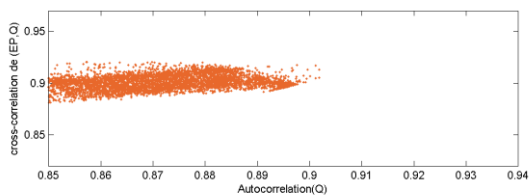
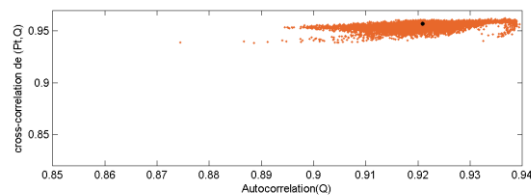
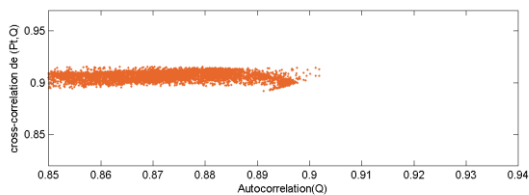
<u>Sainte Anne2</u>	46,8525	-71,87472	1546	5
<u>Sainte Marguerite Nord Est</u>	48,26806	-69,90917	1097	6
<u>Suffolk</u>	45,88389	-75,02167	62,6	4
<u>Trois Pistoles</u>	48,08917	-69,19528	930	2
<u>Valin</u>	48,48806	-70,97222	768	6
<u>Vermillon</u>	47,67694	-73,04083	2662	5
<u>Yamaska</u>	45,62889	-72,93917	3334	3
<u>Yamaska Nord2</u>	45,36028	-72,78028	235	3

Annexe F : LISTE DES BASSINS VERSANTS VALIDÉS PAR MOHYSE

Station	Latitude	Longitude	Aire (km ²)	Région
<u>Petite Riviere Cascapedia</u>	48,23222	-65,73306	1340	1
<u>Bourbon</u>	46,18417	-71,75417	48,1	2
<u>Boyer</u>	46,81583	-70,90056	191	2
<u>Chaudiere2</u>	46,09639	-70,65444	3085	2
<u>Du Sud</u>	46,82000	-70,75611	821	2
<u>Etchemin</u>	46,69139	-71,06806	1152	2
<u>Trois Pistoles</u>	48,08917	-69,19528	930	2
<u>Des Anglais1</u>	45,10028	-73,76250	246	3
<u>Noire2</u>	45,07667	-73,85000	46,5	3
<u>Desert</u>	46,59000	-76,04139	1646	4
<u>Kinojevis</u>	48,36583	-78,85444	2594	4
<u>Picanoc</u>	46,07806	-76,06944	1277	4
<u>Rouge1</u>	45,73833	-74,68917	5479	4
<u>Aux Pommes</u>	46,69639	-71,68778	97,8	5
<u>Batiscan</u>	46,58556	-72,40472	4504	5
<u>Beauport</u>	46,86500	-71,20722	23,9	5
<u>Bras Du Nord</u>	46,97667	-71,84750	646	5
<u>De L Achigan</u>	45,84611	-73,49250	641	5
<u>Jacques Cartier</u>	46,89250	-71,52611	1997	5
<u>L Assomption</u>	46,01306	-73,42944	1288	5
<u>La Chevrotiere</u>	46,73722	-72,00083	19,4	5
<u>Matawin</u>	46,67722	-73,91500	1387	5
<u>Sainte Anne2</u>	46,85250	-71,87472	1546	5
<u>Vermillon</u>	47,67694	-73,04083	2662	5
<u>Aux Saumons</u>	48,68389	-72,51278	591	6
<u>Cyriac</u>	48,23583	-71,28861	350	6
<u>Ecorces</u>	48,18278	-71,64472	1115	6
<u>Metabetchouane</u>	48,37556	-71,99667	2212	6
<u>Mistassibi</u>	48,94250	-72,17250	8743	6
<u>Mistassini</u>	48,88861	-72,27250	9631	6
<u>Petit Saguenay</u>	48,09167	-70,02972	433	6
<u>Petite Riviere Peribonka</u>	48,81472	-72,04639	1020	6
<u>Natashquan</u>	50,42750	-61,71222	15693	7
<u>Harricana</u>	48,59778	-78,11028	3724	8
<u>Grande Riviere De La Baleine</u>	55,23778	-76,98472	32468	9

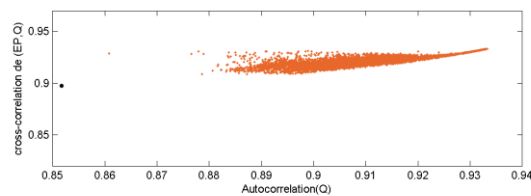
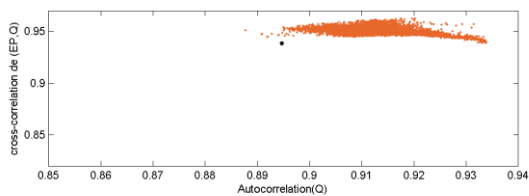
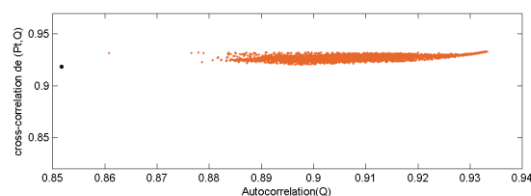
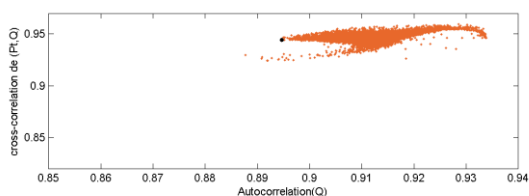
Annexe G : LES RESULTATS DE L'APPLICATION DE LA METHODE DE COVARIANCE SUR LE MODÈLE GR4J

Cette section présente les figures ayant permis la validation par la méthode de la covariance du modèle GR4J pour les 126 Bassins versants utilisés dans cette étude :



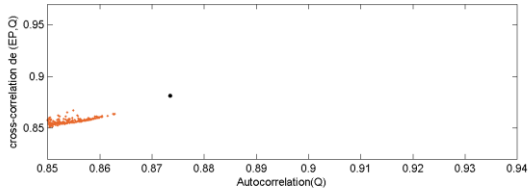
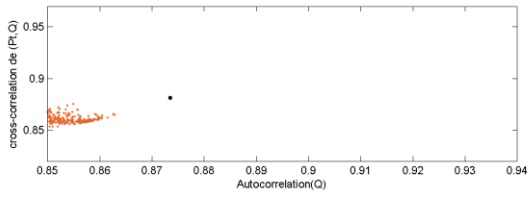
A l'ours

Ashuapmushuan

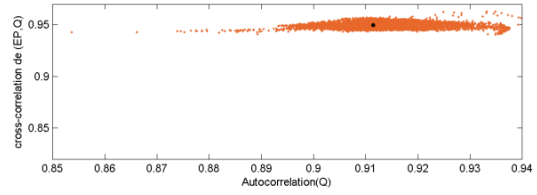
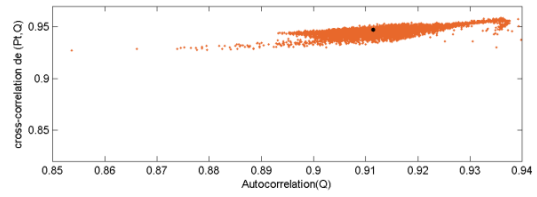


Au Saumon

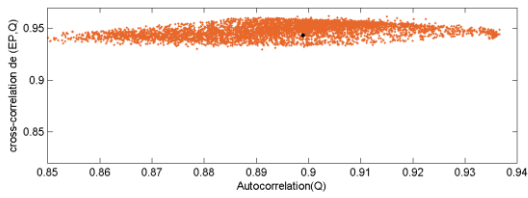
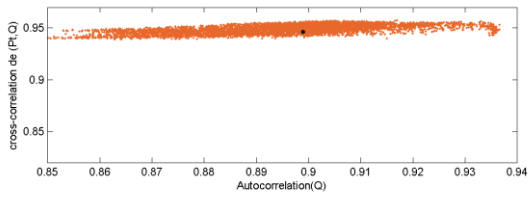
Aux_Brochets



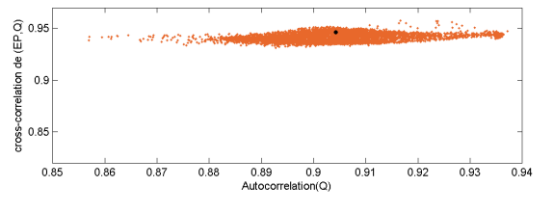
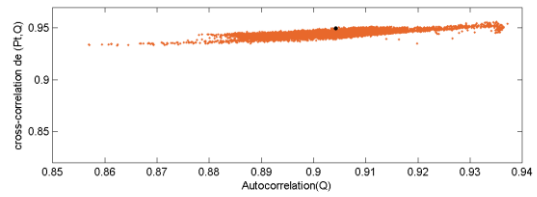
Aux_Melezes



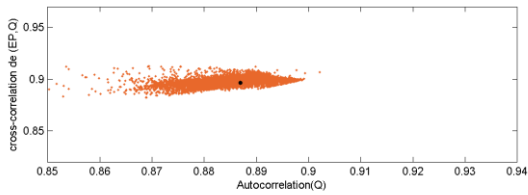
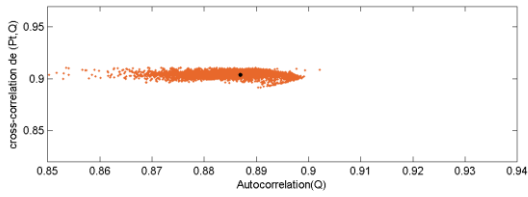
Aux_Pommes



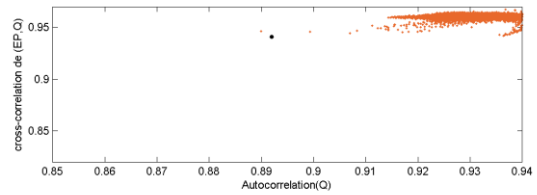
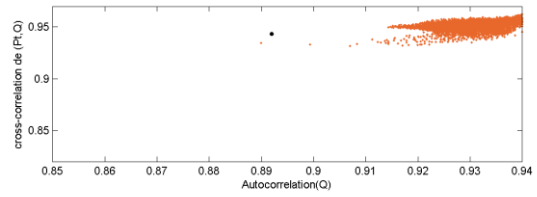
Aux_Saumons



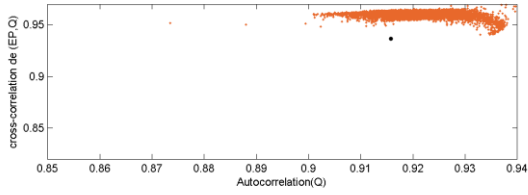
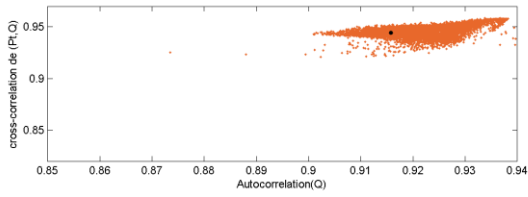
Batiscan



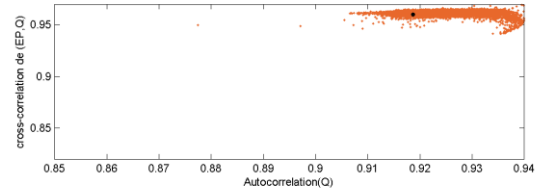
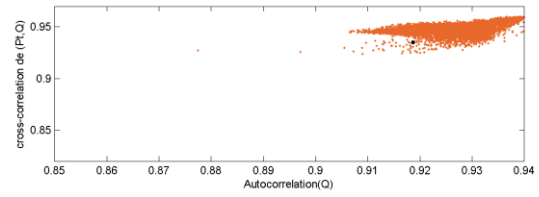
Beauport



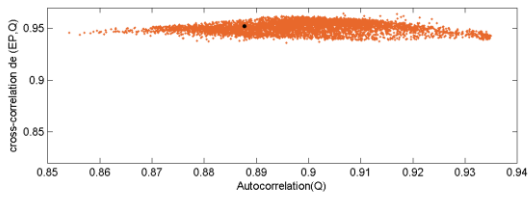
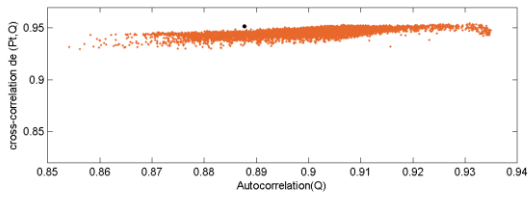
Beaurivage



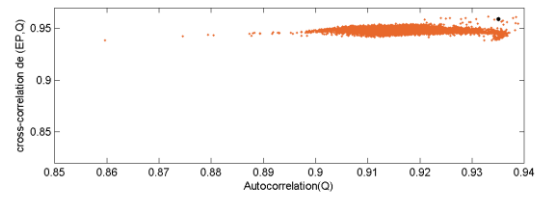
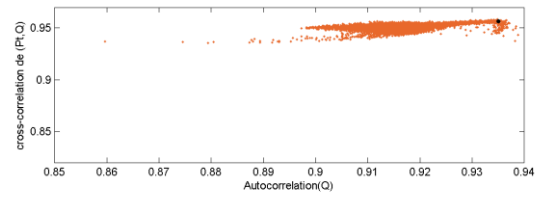
Becancour1



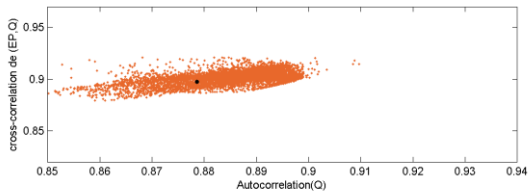
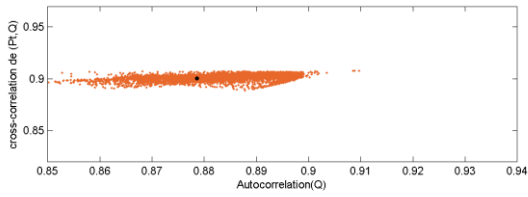
Becancour2



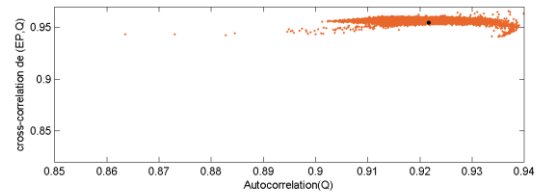
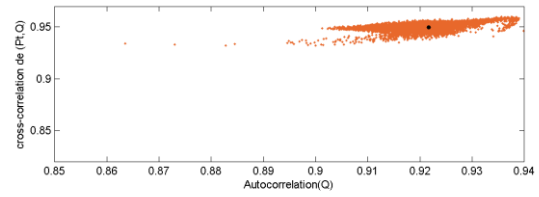
Belle_Riviere



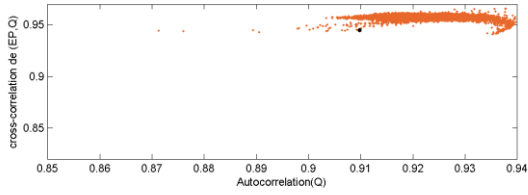
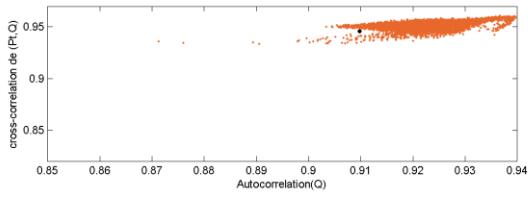
Bonaventure



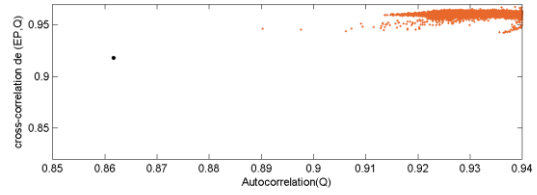
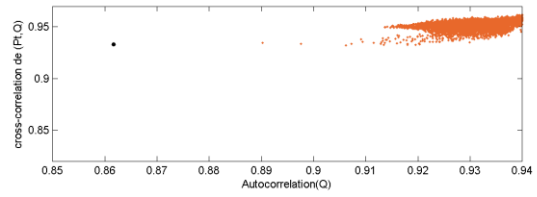
Bourbon



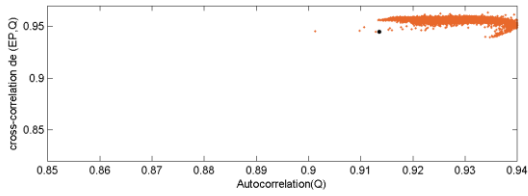
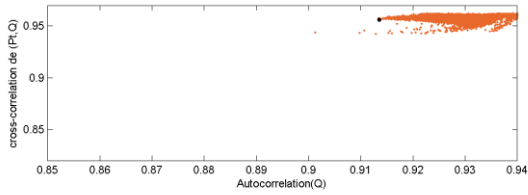
Boyer



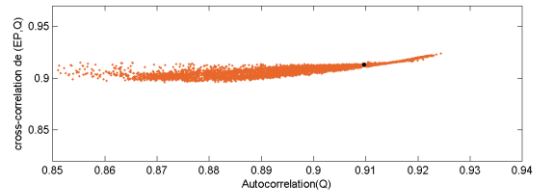
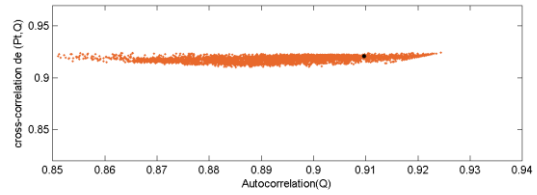
Boyer_Sud



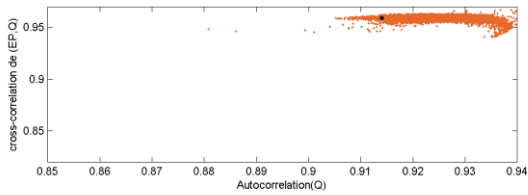
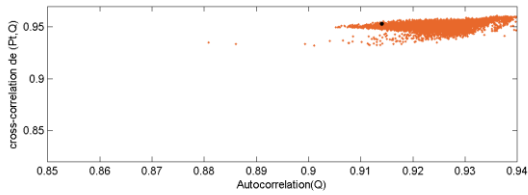
Bras_D_Henri



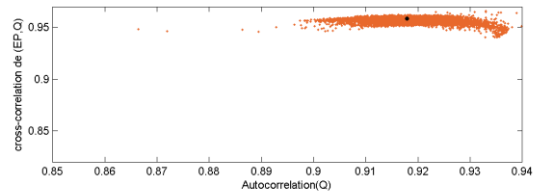
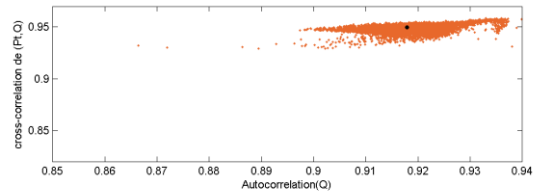
Cascapedia



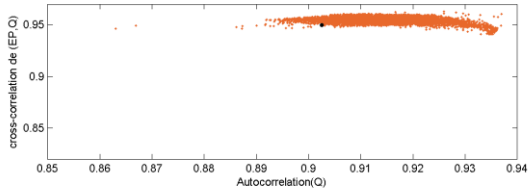
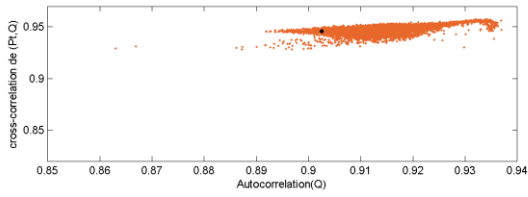
Chateaugay



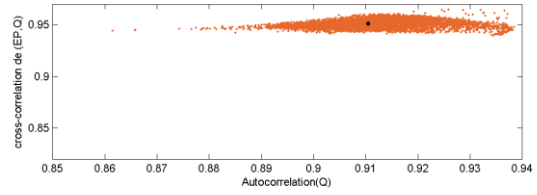
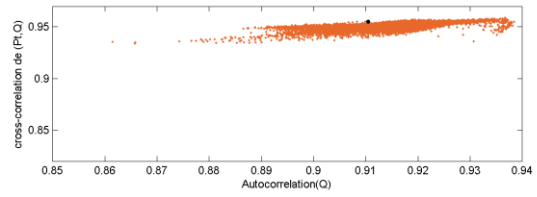
Chaudiere1



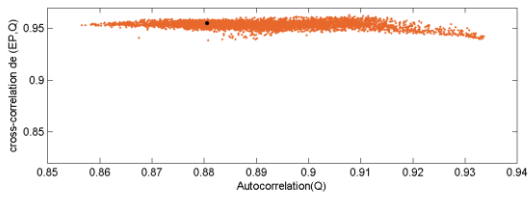
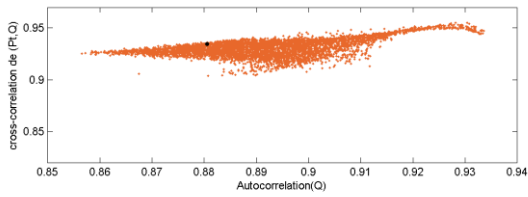
Chaudiere2



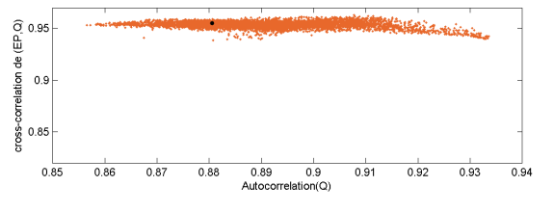
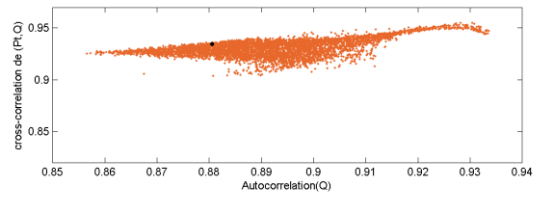
Coaticook



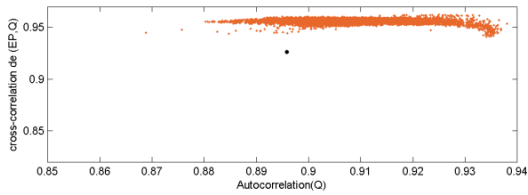
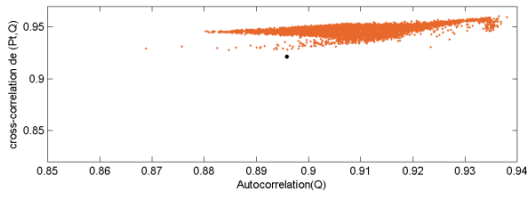
Cyriac



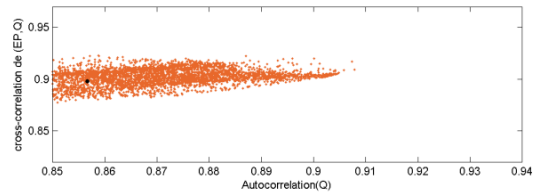
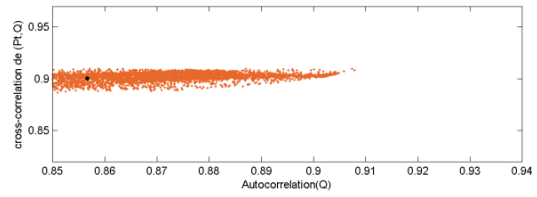
Dartmouth



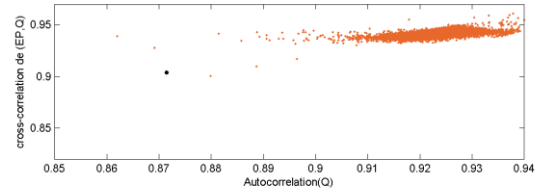
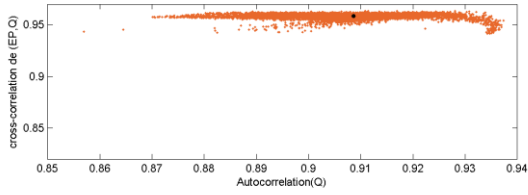
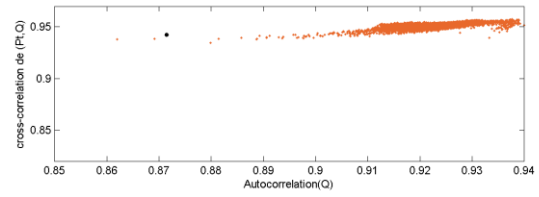
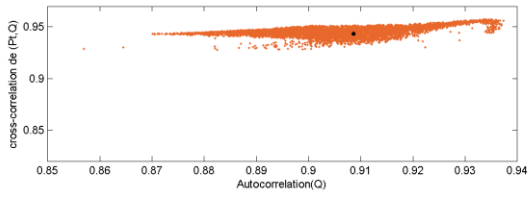
David



De la roche

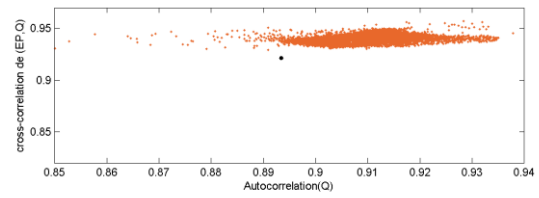
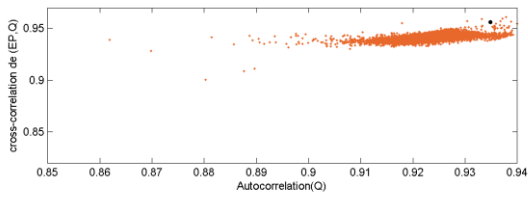
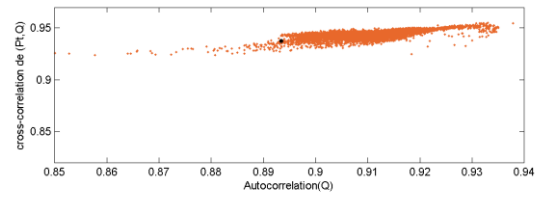
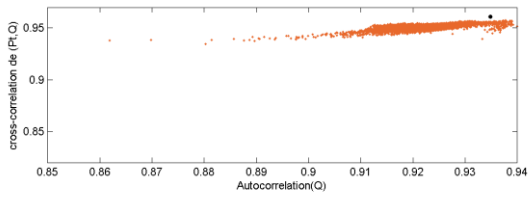


Des anglais 1



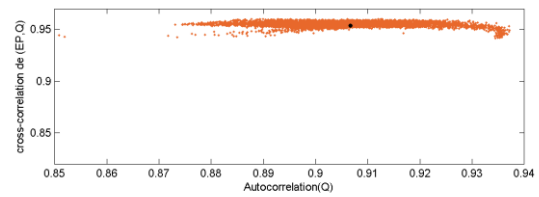
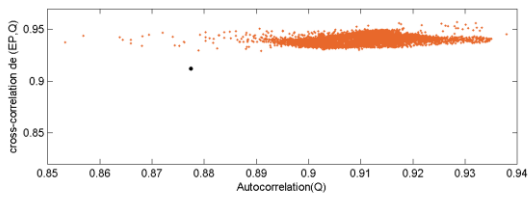
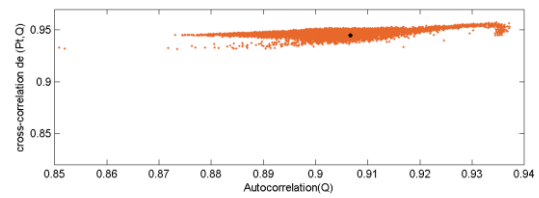
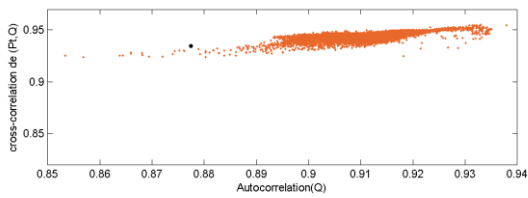
Des anglais 2

Des aulnaies1



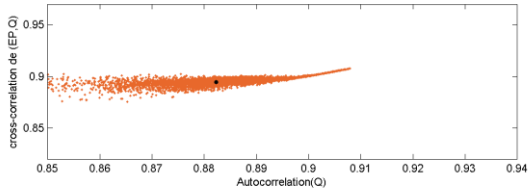
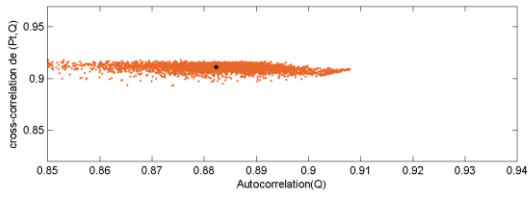
Des aulmaies 2

Des eaux volees 1

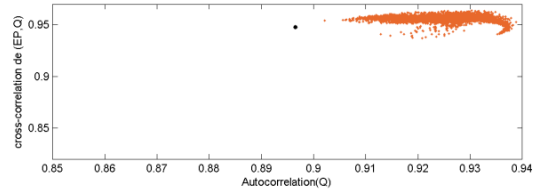
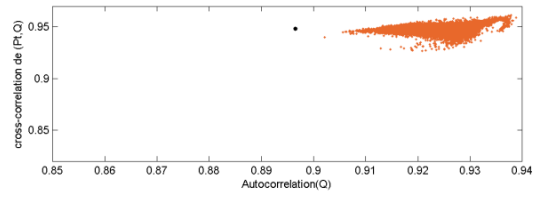


Des eaux volees 2

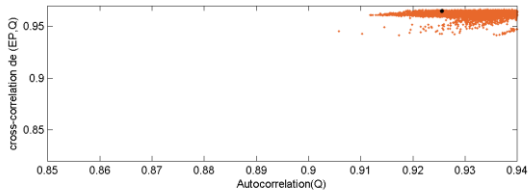
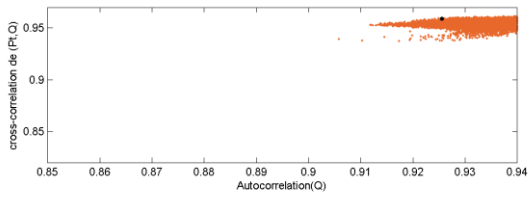
Des hurons



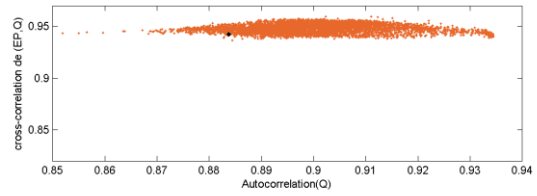
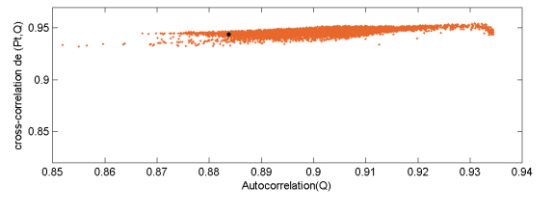
Desert



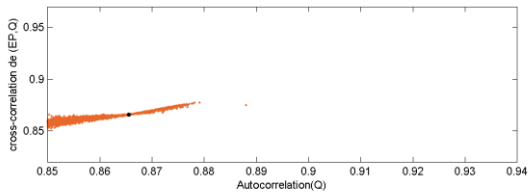
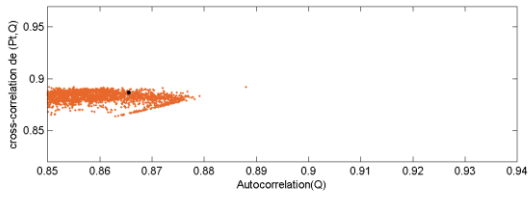
Doncaster



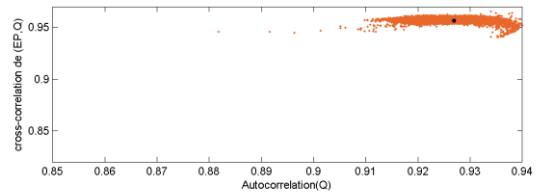
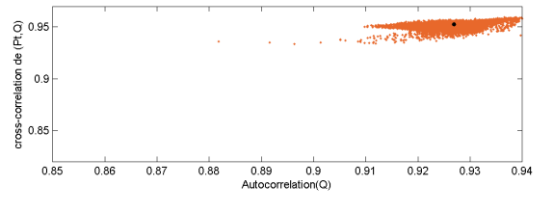
Du loup 1



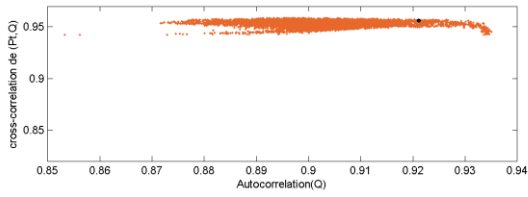
Du loup 2



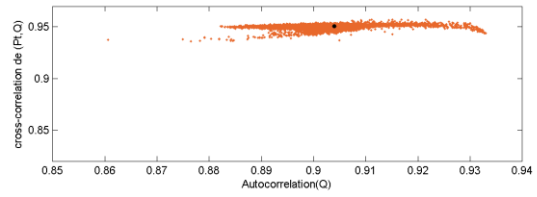
Du moulin



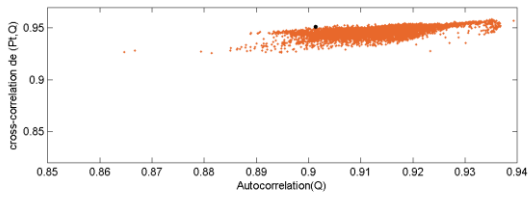
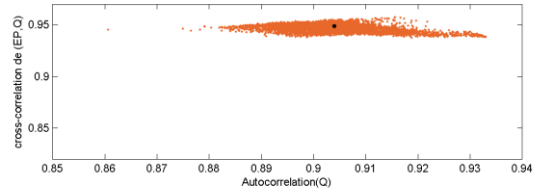
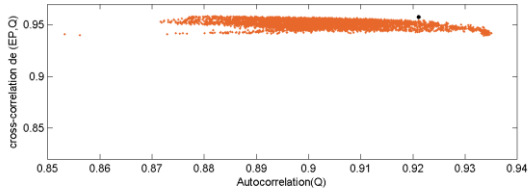
Du sud



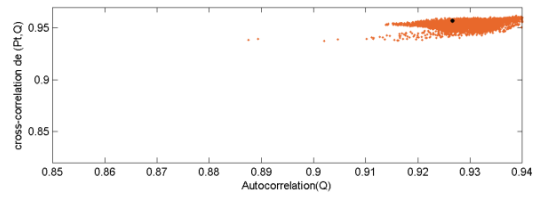
Dumoine



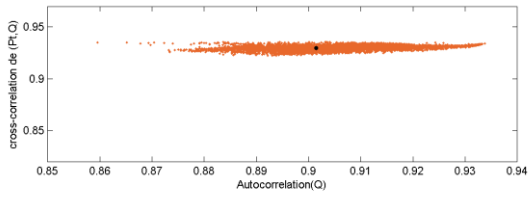
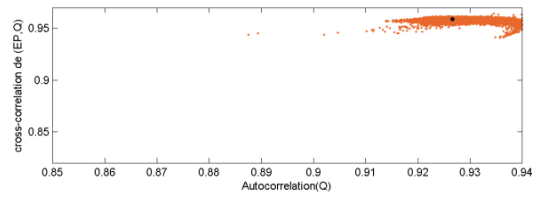
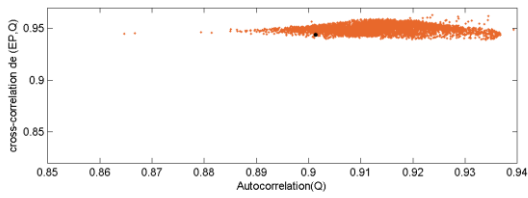
Eaton



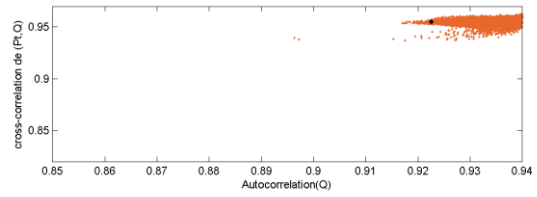
Ecorces



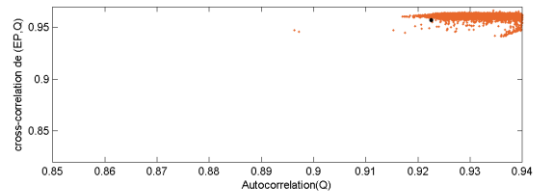
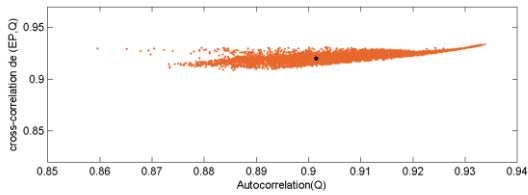
Etchemin

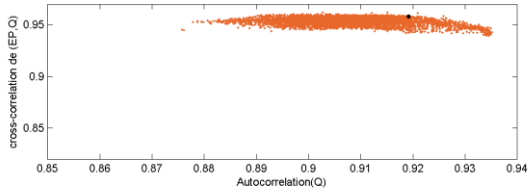
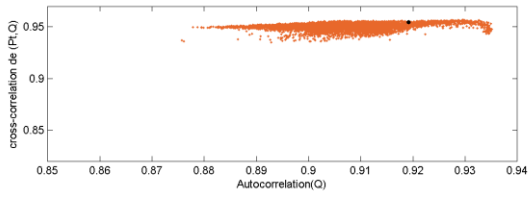


Ewing

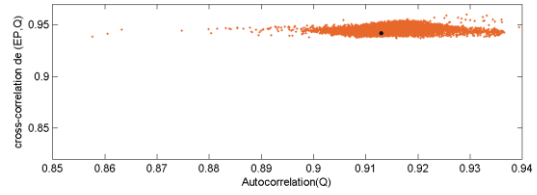
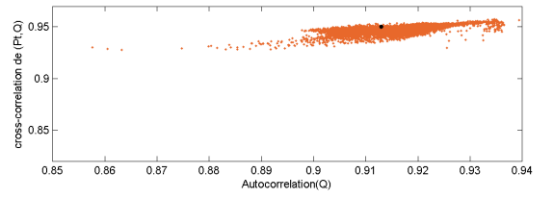


Famine

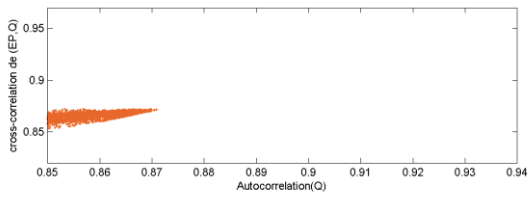
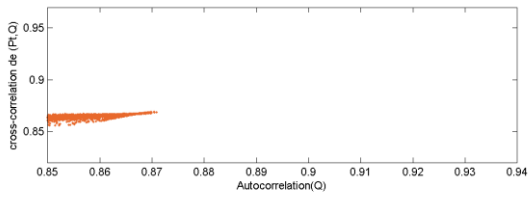




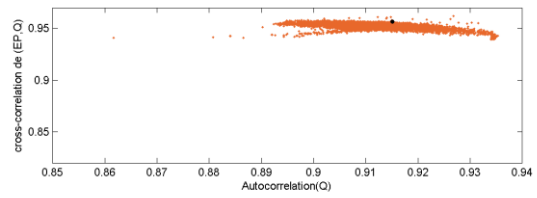
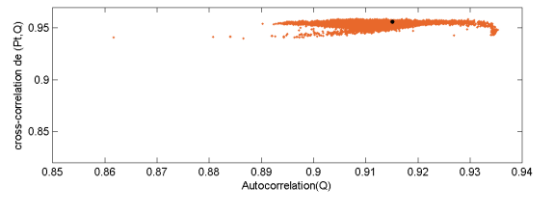
Gatineau



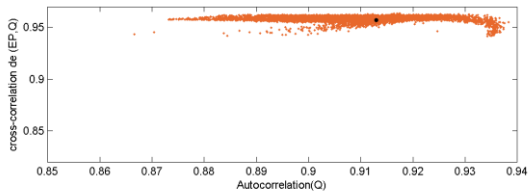
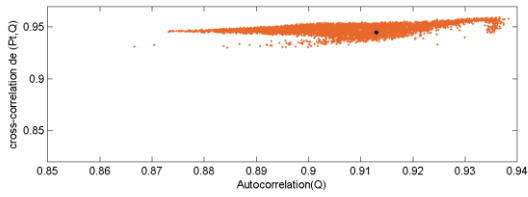
Jacques cartier



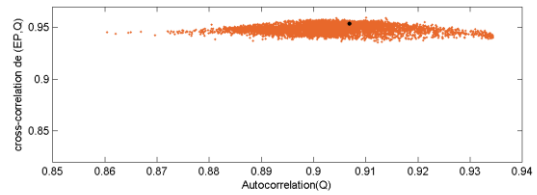
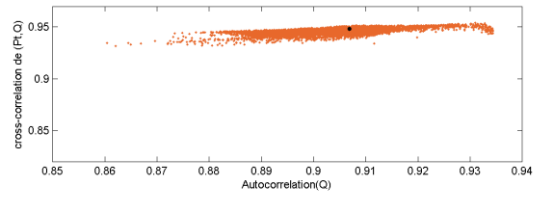
Kamouraska



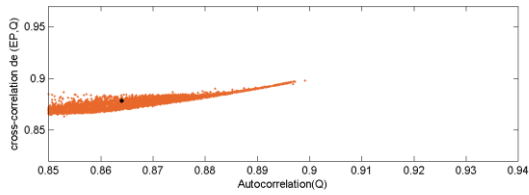
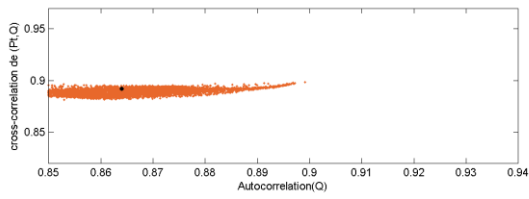
Kinojevis



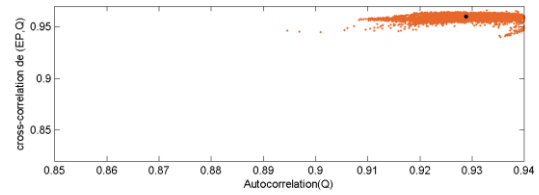
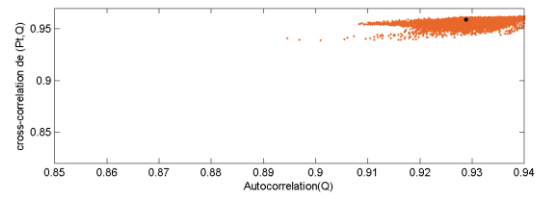
L' acadie



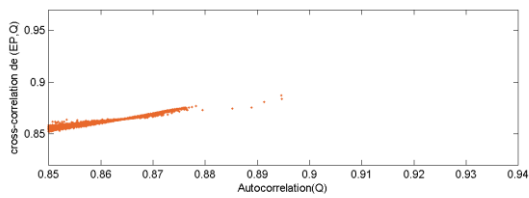
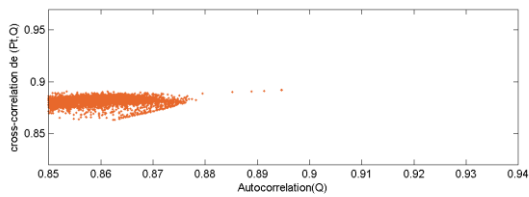
L' assumption



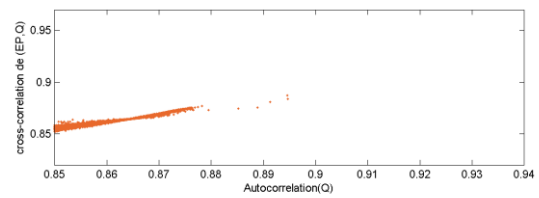
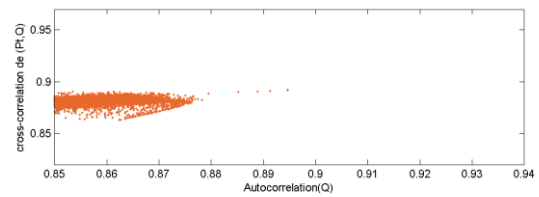
La chevrotiere



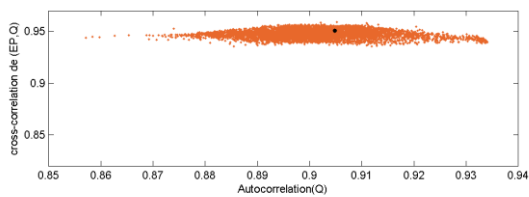
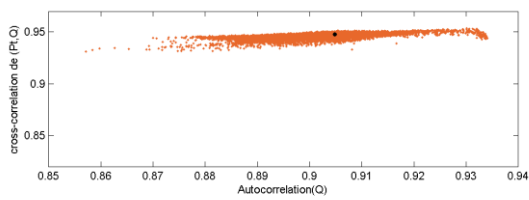
Malbaie



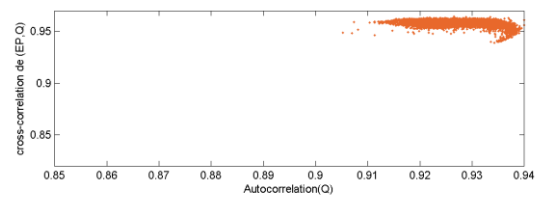
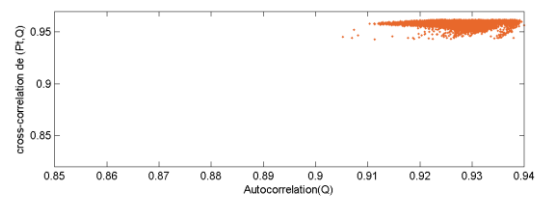
Mars



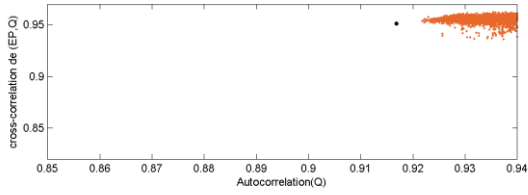
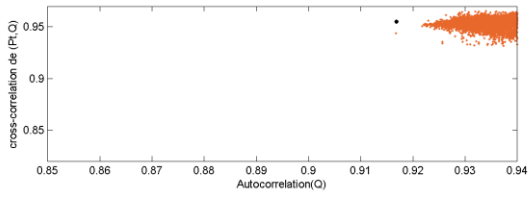
Maskinonge



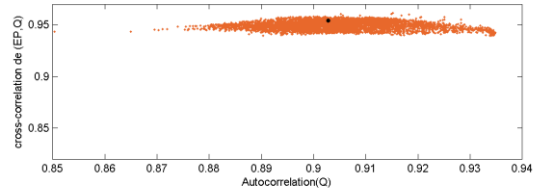
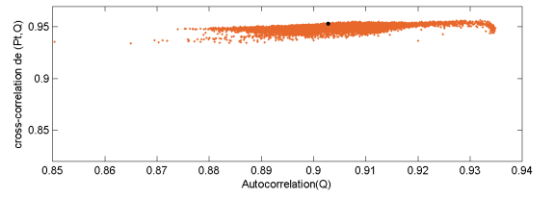
Mastigouche



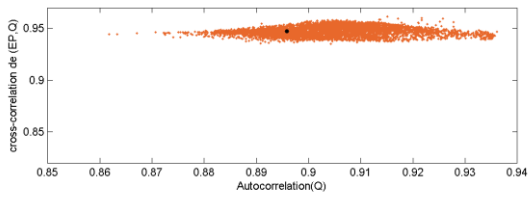
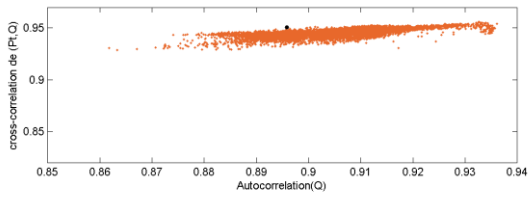
Matane



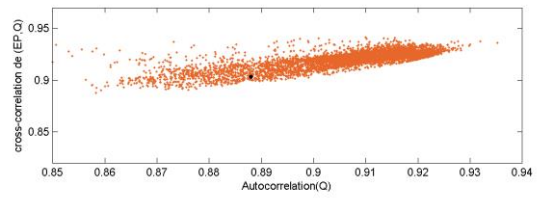
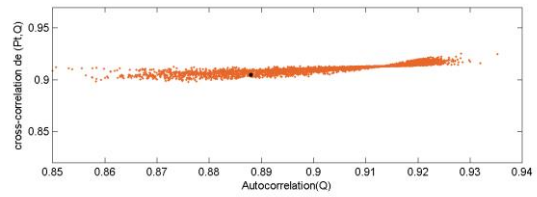
Matapedia



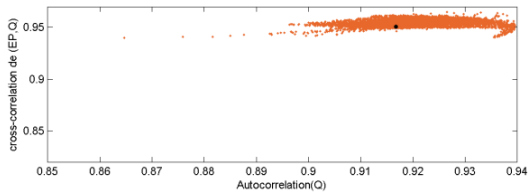
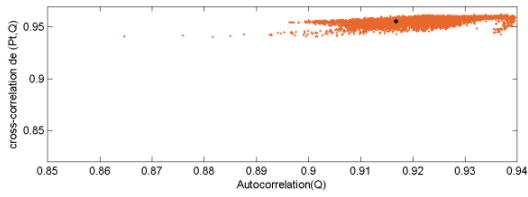
Matawin



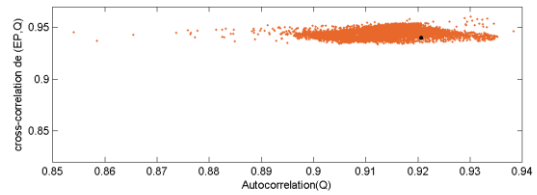
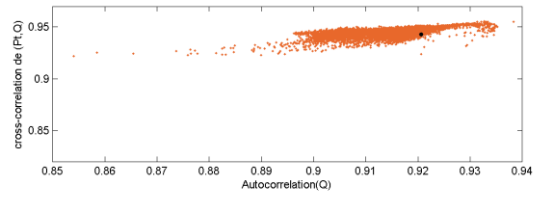
Metabetchouane



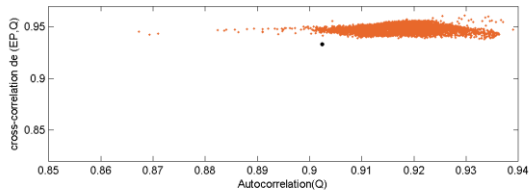
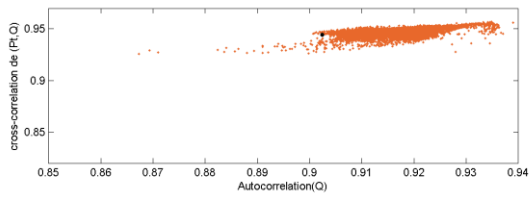
Mistassibi



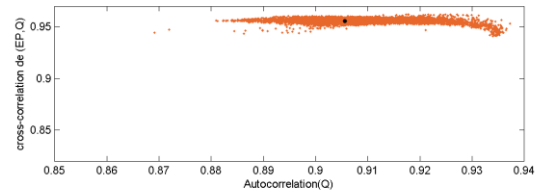
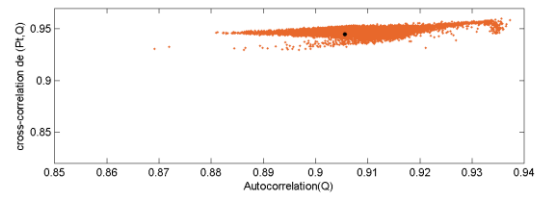
Mistassini



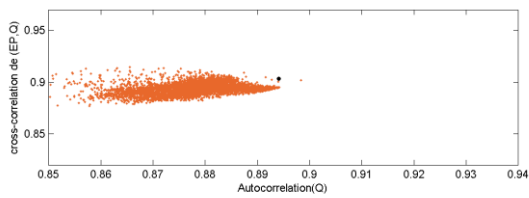
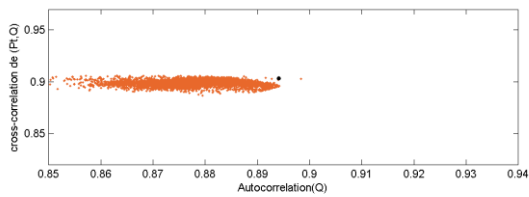
Montmorency 1



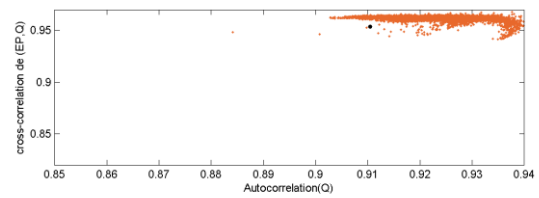
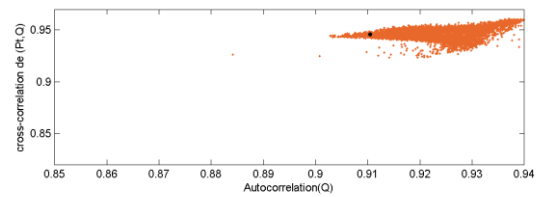
Montmorency 1



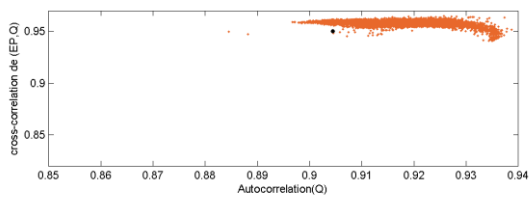
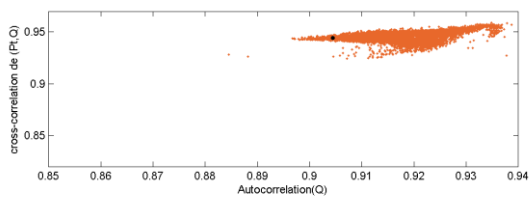
Morpions



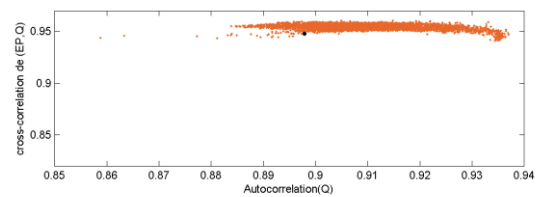
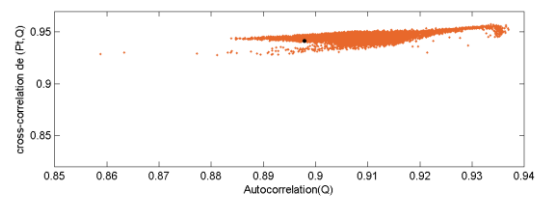
Nelson



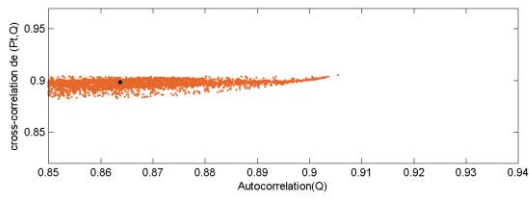
Nicolet



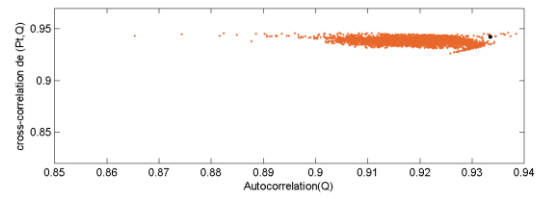
Nicolet sud ouest



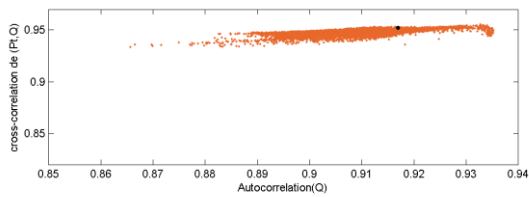
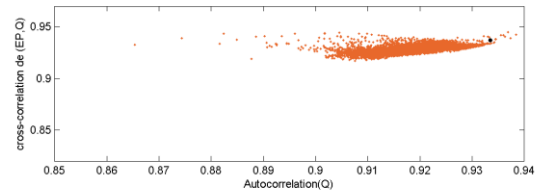
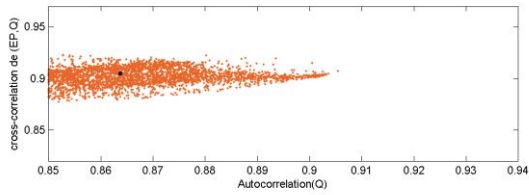
Noir 1



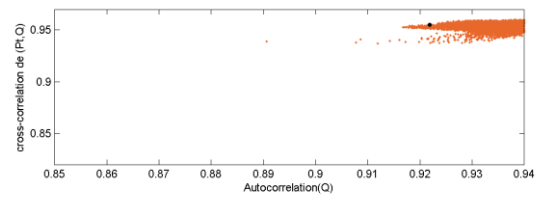
Noire 2



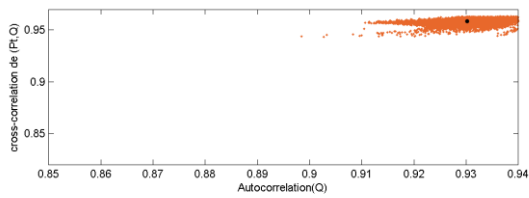
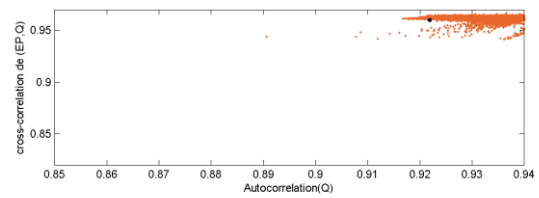
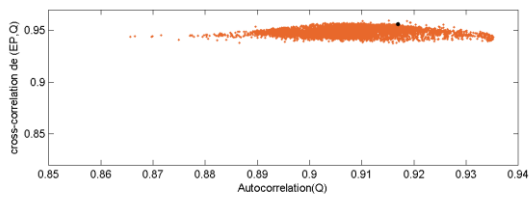
Nouvelle



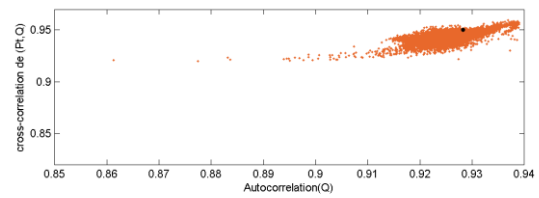
Ouateau



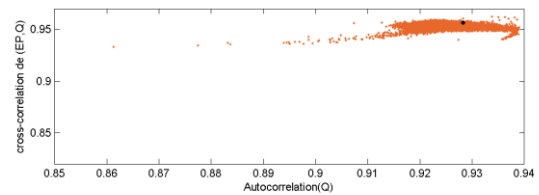
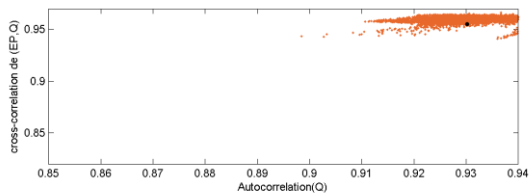
Ouelle

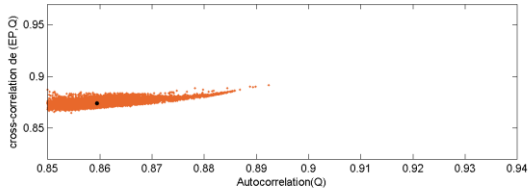
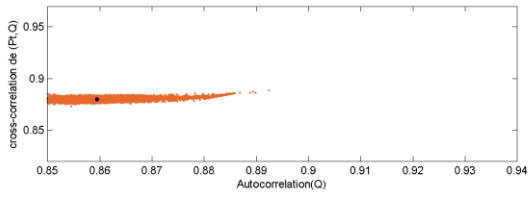


Petit Saguenay

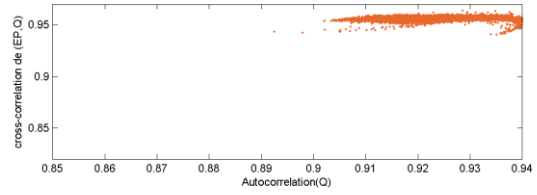
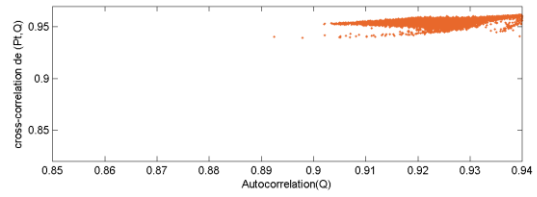


Petite Riviere Cascapedia

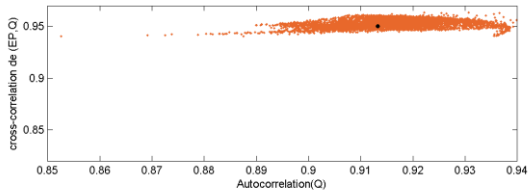
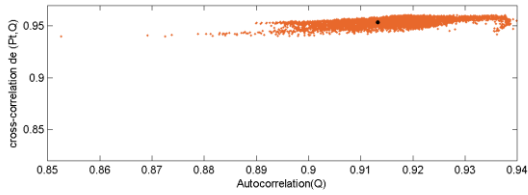




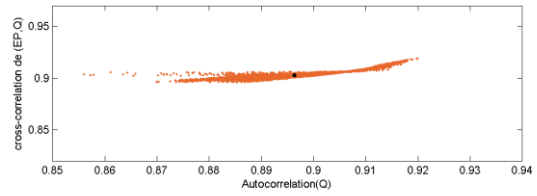
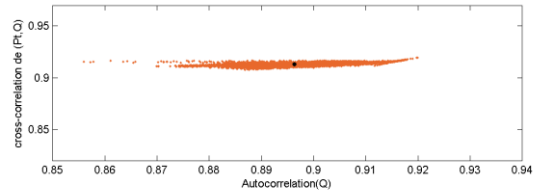
Petite Riviere Du Chene



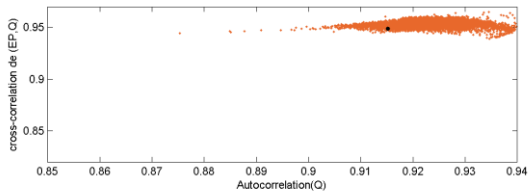
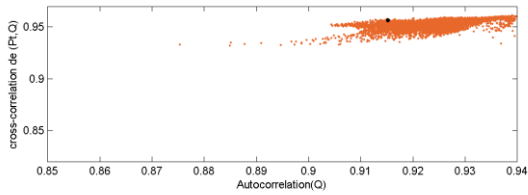
Petite Riviere Neigette



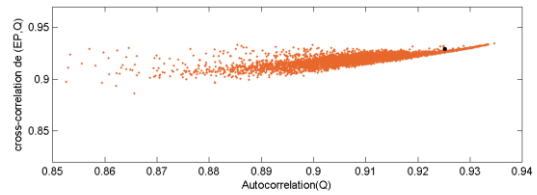
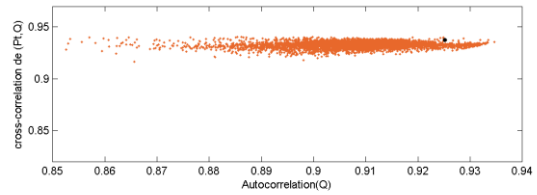
Petite Riviere Peribonka



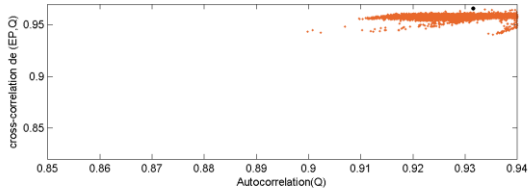
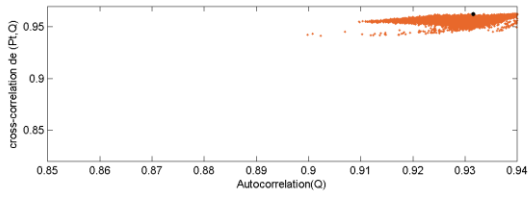
Picanoc



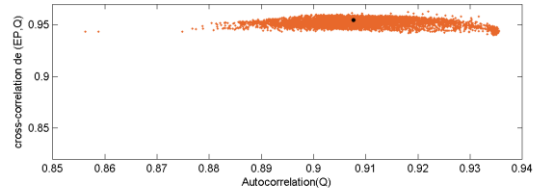
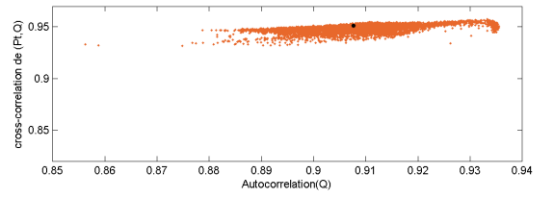
Pikauba 1



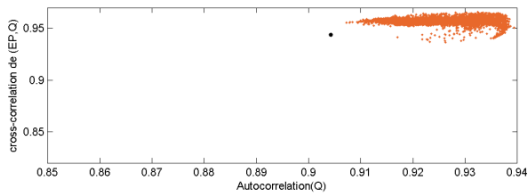
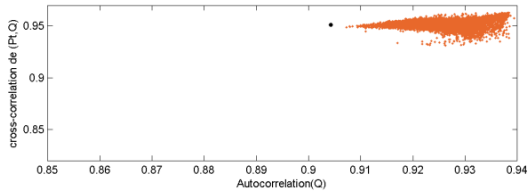
Portneuf



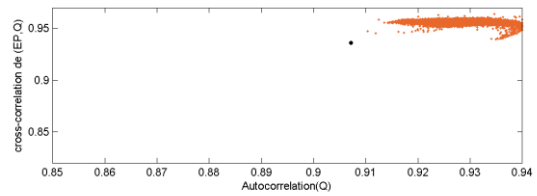
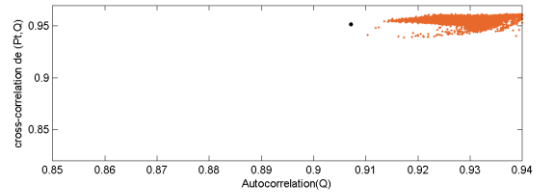
Rimouski



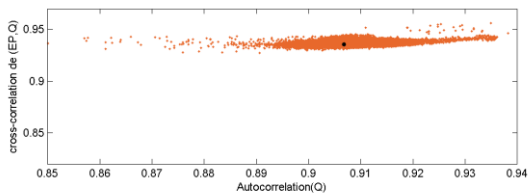
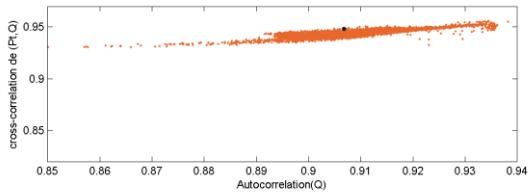
Rouge 1



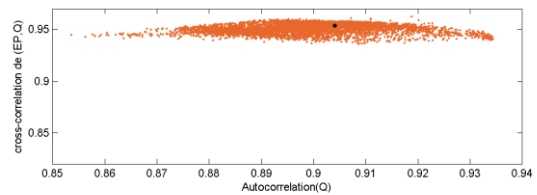
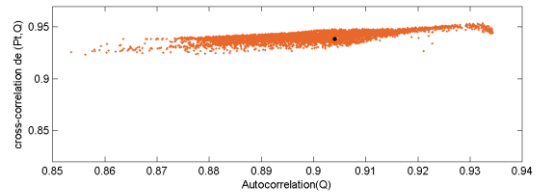
Saint Louis



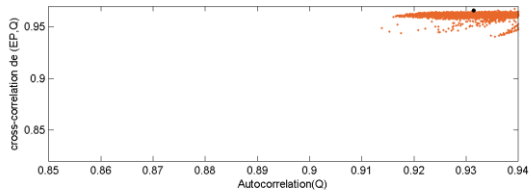
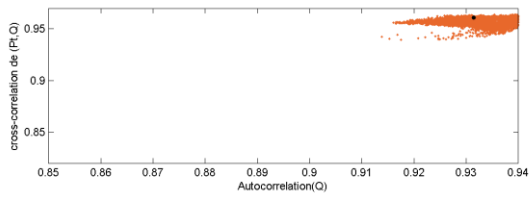
Sainte Anne 1



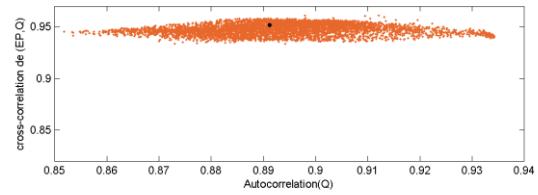
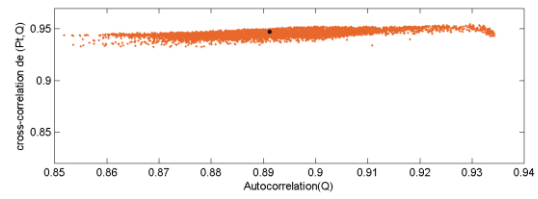
Sainte Anne 2



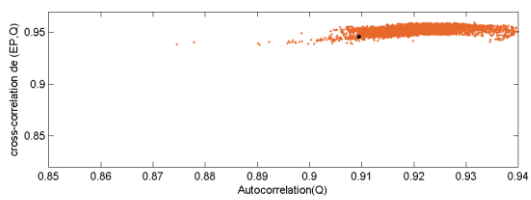
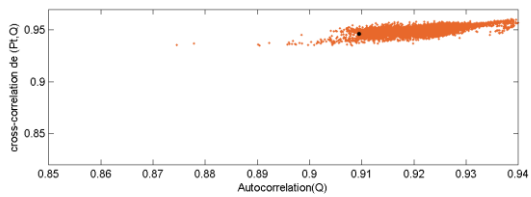
Suffolk



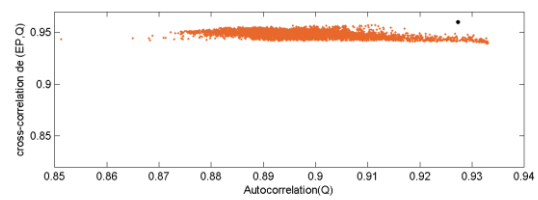
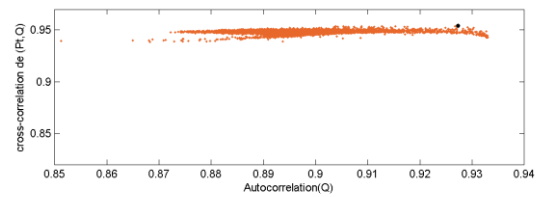
Trois pistoles



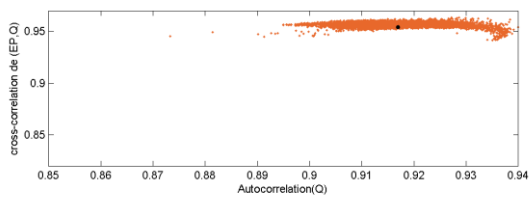
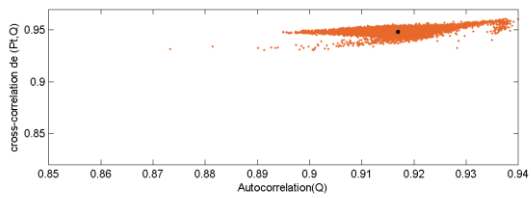
Vermillon



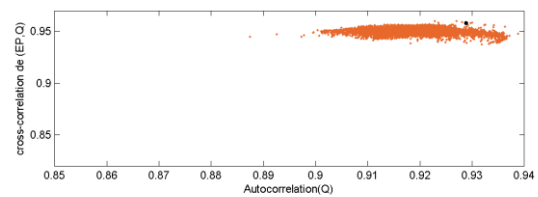
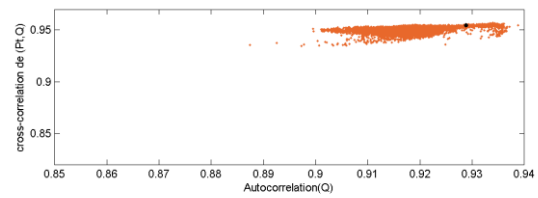
Yamaska



Yamaska Nord 1



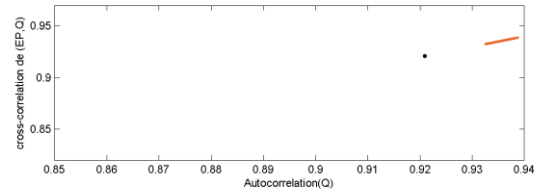
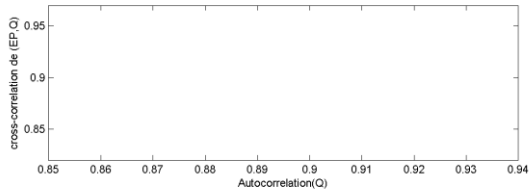
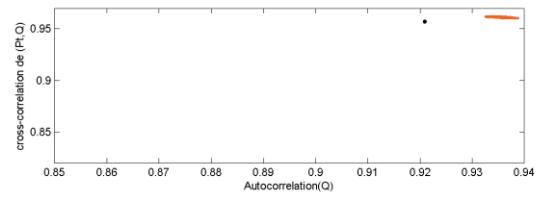
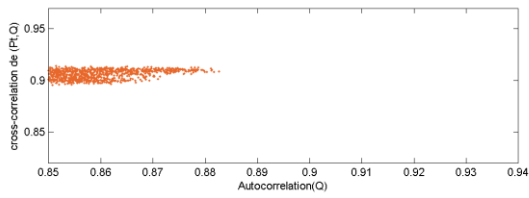
Yamaska Nord 2



York

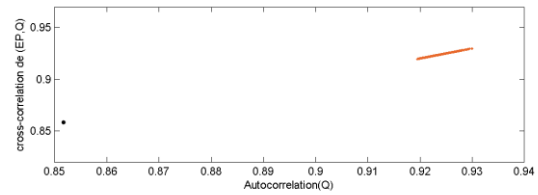
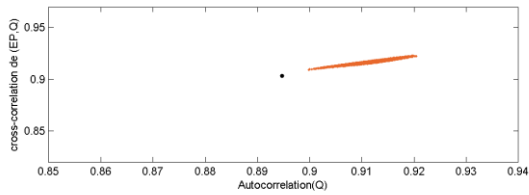
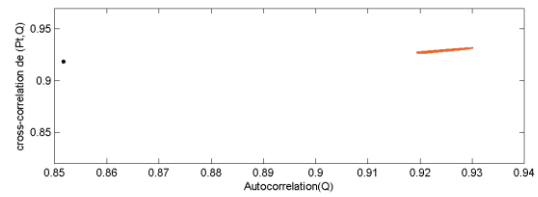
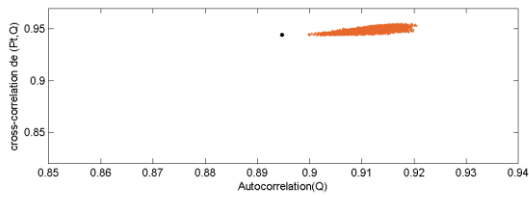
Annexe H : LES RESULTATS DE L'APPLICATION DE LA METHODE DE COVARIANCE SUR LE MODÈLE HBV

Cette section présente les figures ayant permis la validation par la méthode de la covariance du modèle HBV pour les 126 Bassins versants utilisés dans cette étude :



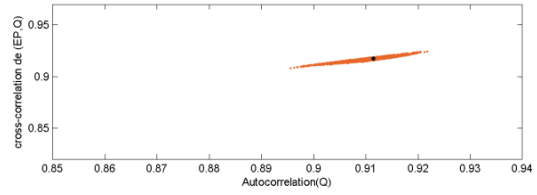
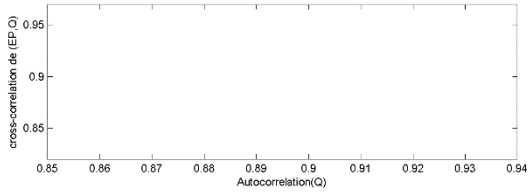
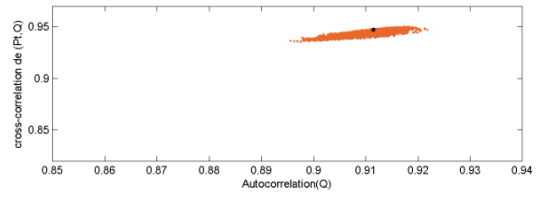
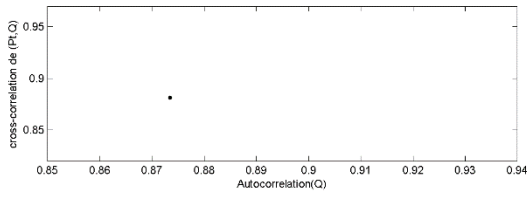
A l'ours

Ashuapmushuan



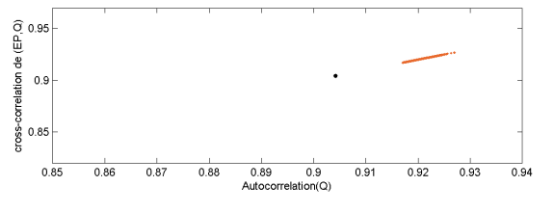
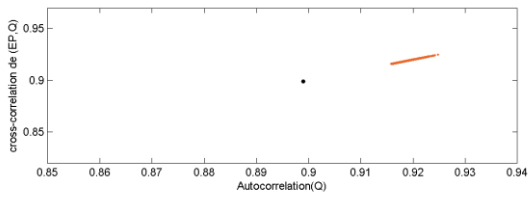
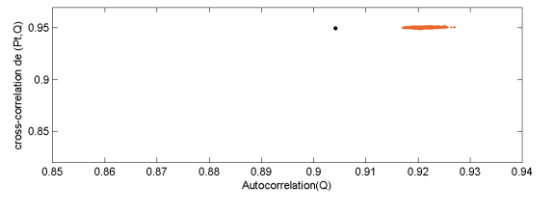
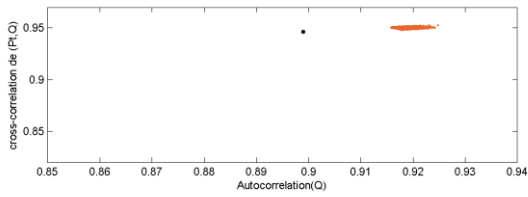
Au saumon

Aux_Brochets



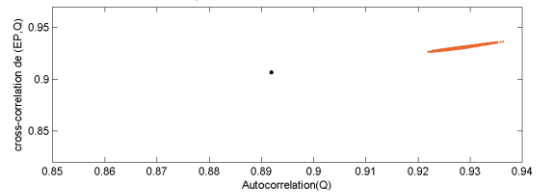
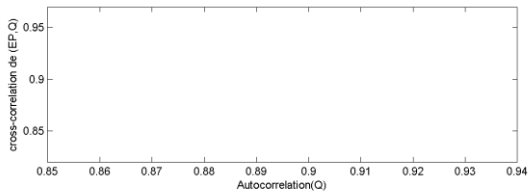
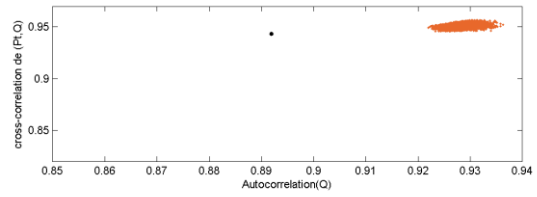
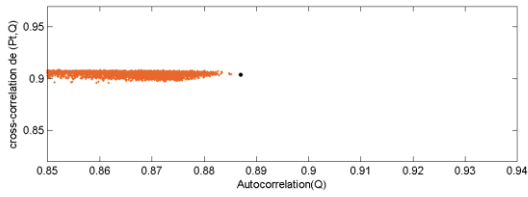
Aux_Melezes

Aux_Pommes



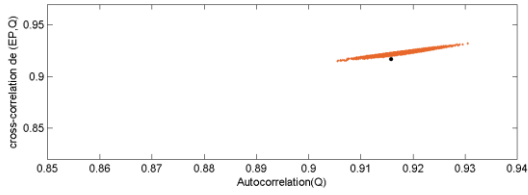
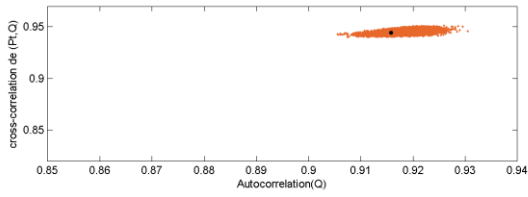
Aux_Saumons

Batiscan

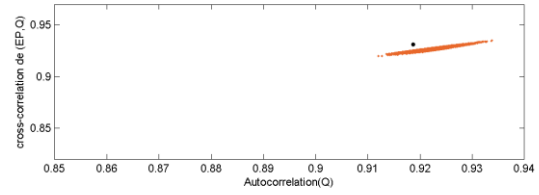
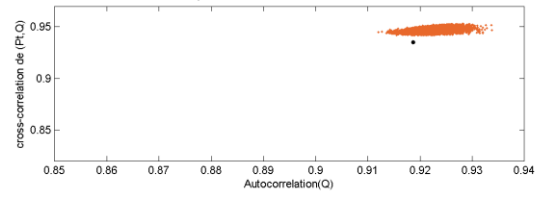


Beauport

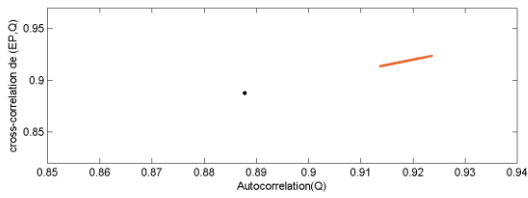
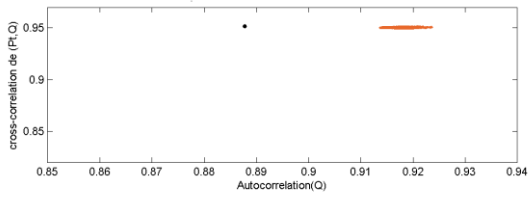
Beaurivage



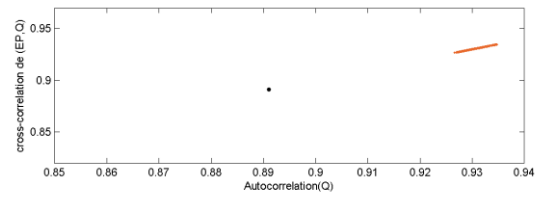
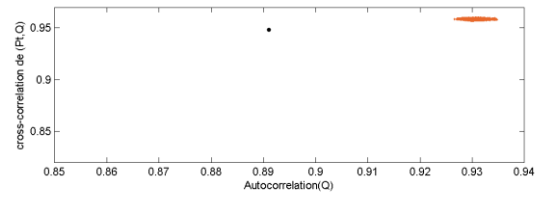
Becancour1



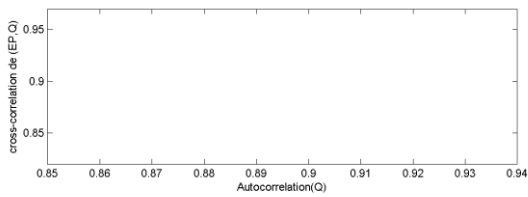
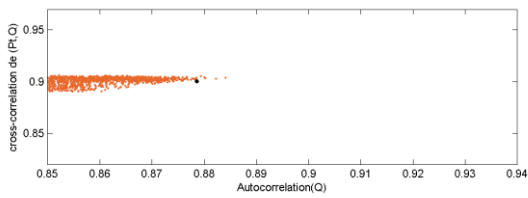
Becancour2



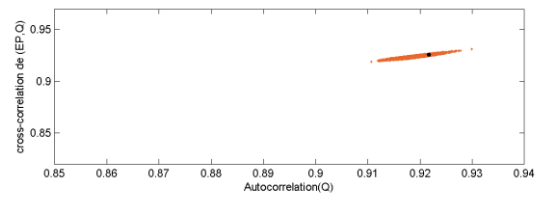
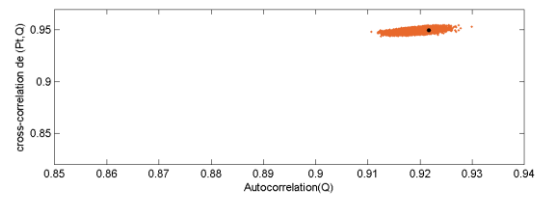
Belle_Riviere



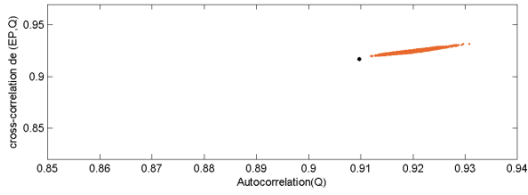
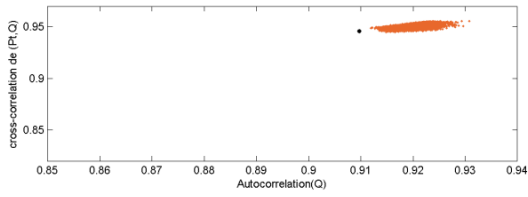
Bell



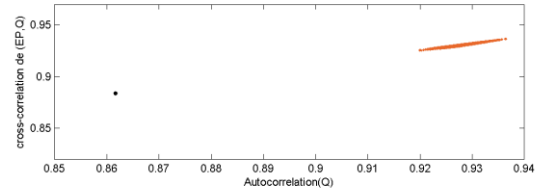
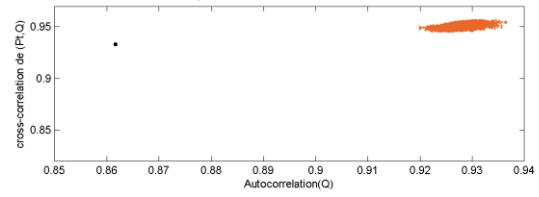
Bourbon



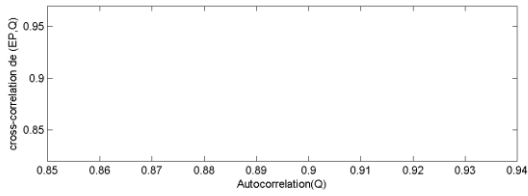
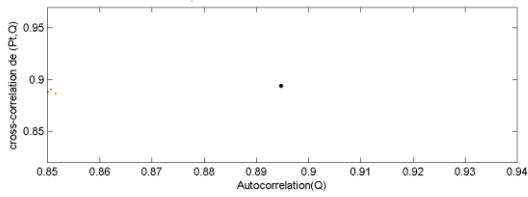
Boyer



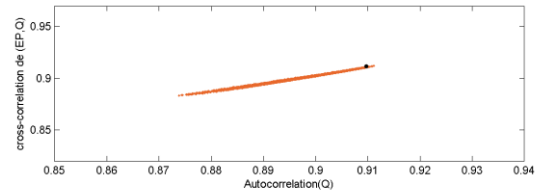
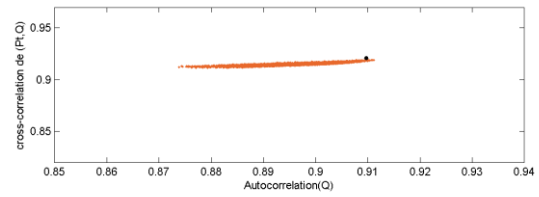
Boyer_Sud



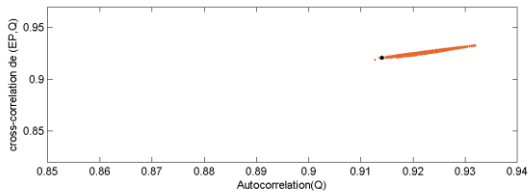
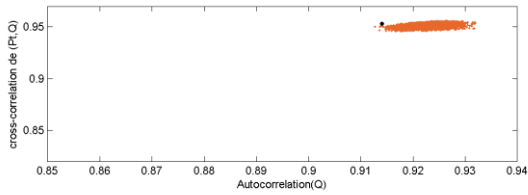
Bras_D_Henri



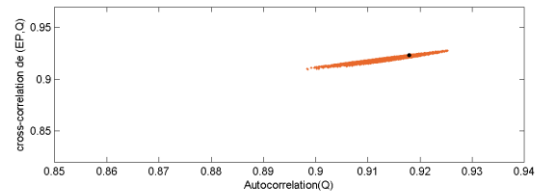
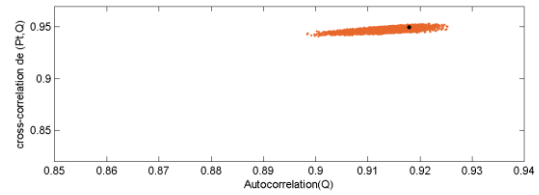
Caniapiscou



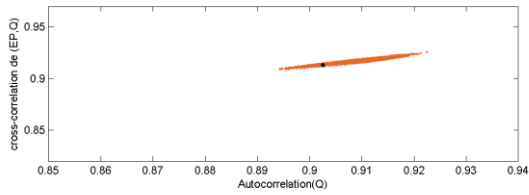
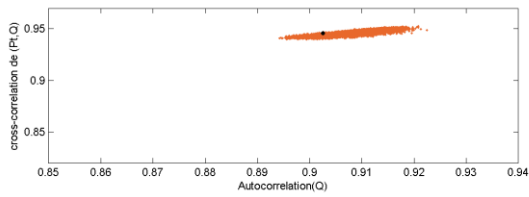
Chateauguay



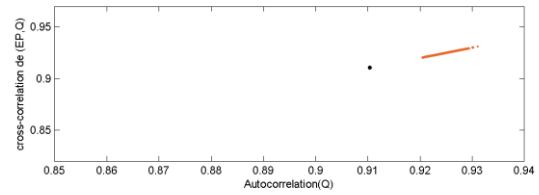
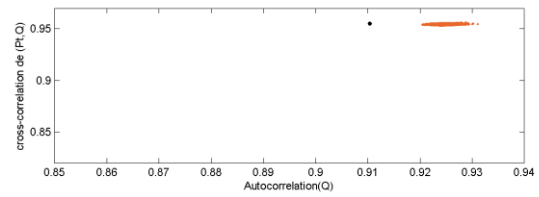
Chaudiere1



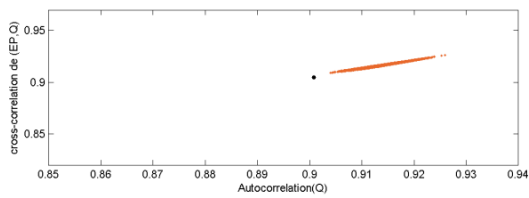
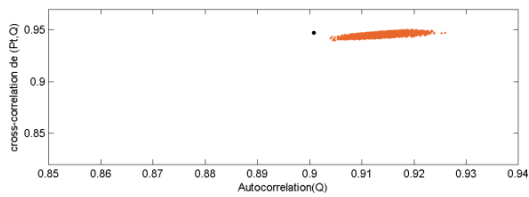
Chaudiere2



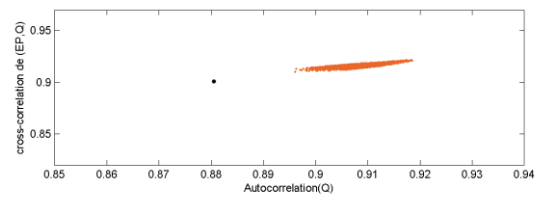
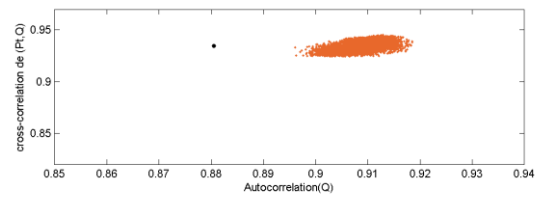
Coaticook



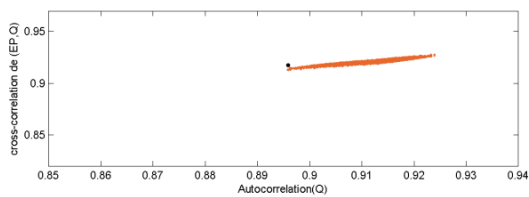
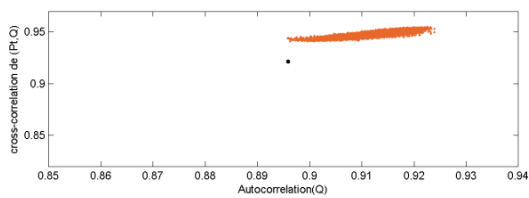
Cyriac



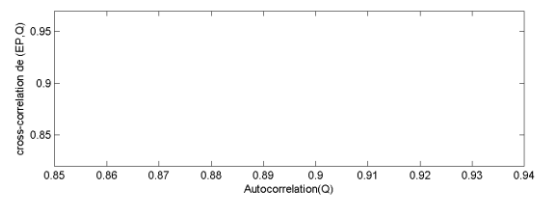
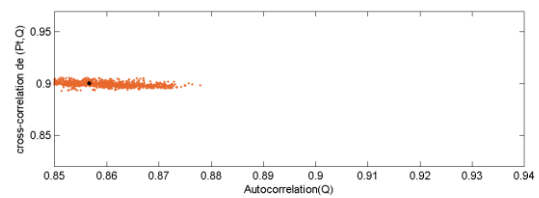
Dartmouth



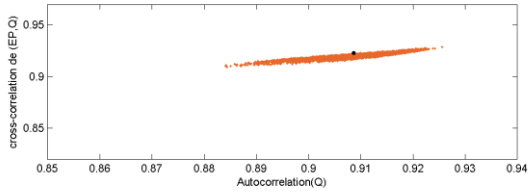
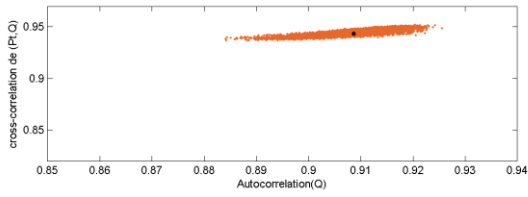
David



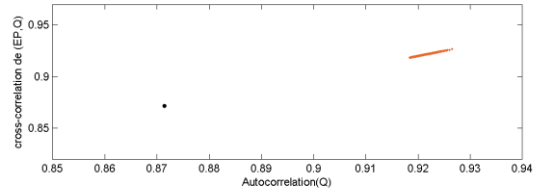
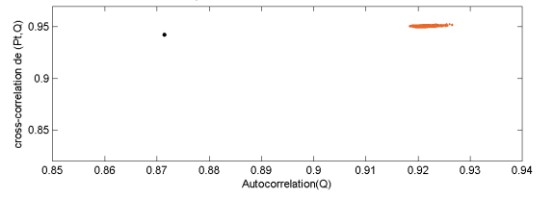
De la roche



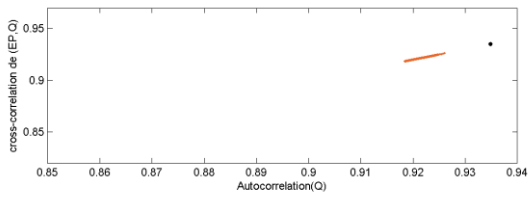
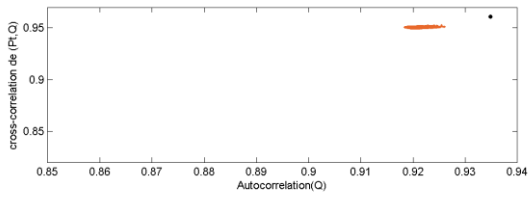
Des anglais 1



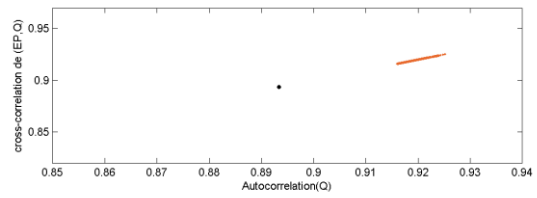
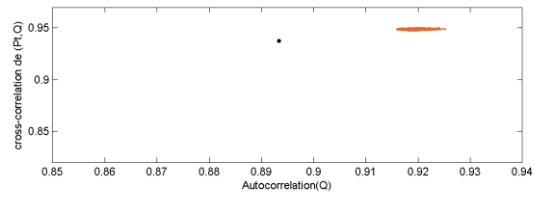
Des anglais 2



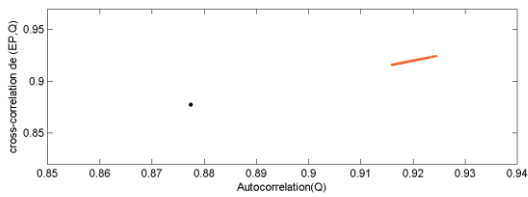
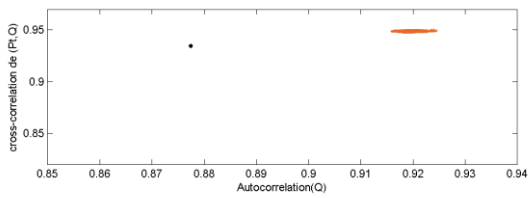
Des aulnaies1



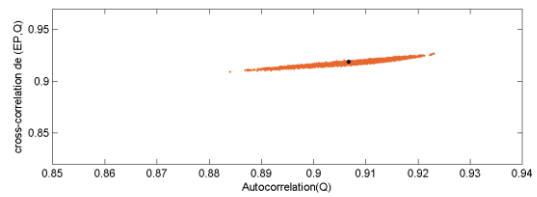
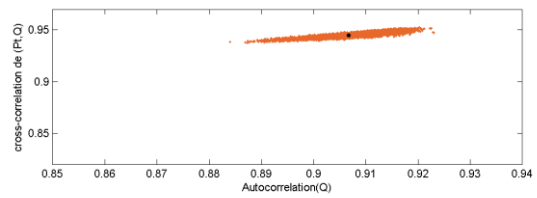
Des aulmaies 2



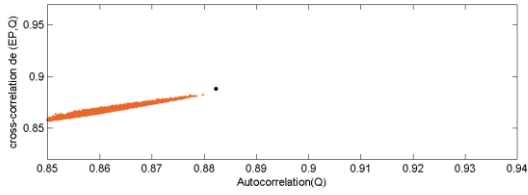
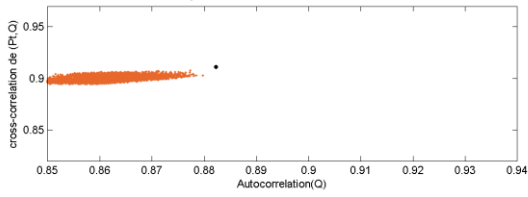
Des eaux volees 1



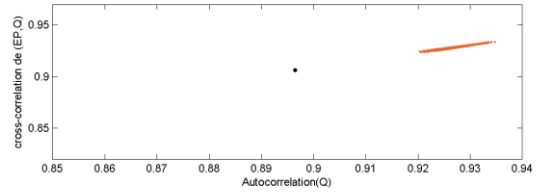
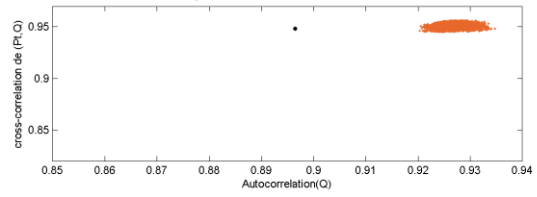
Des eaux volees 2



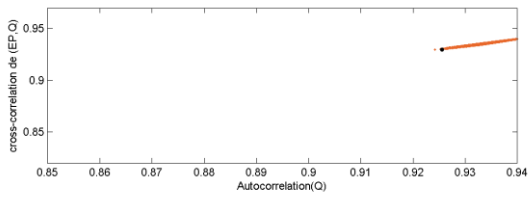
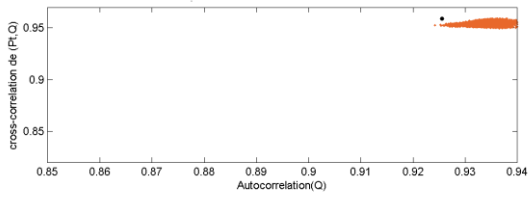
Des hurons 1



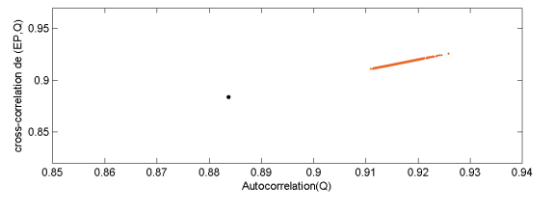
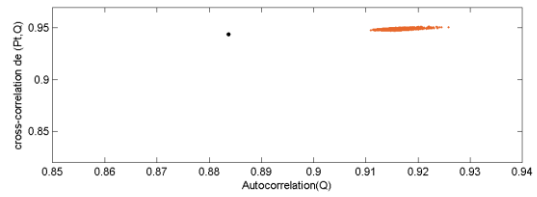
Desert



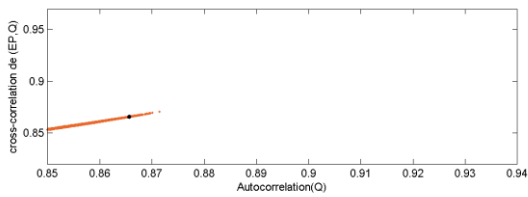
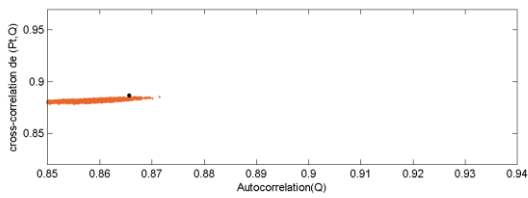
Doncaster



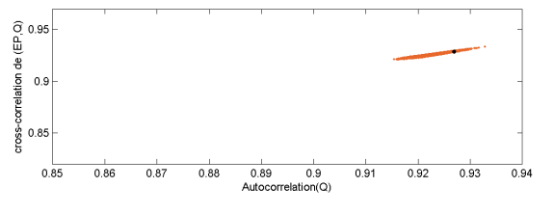
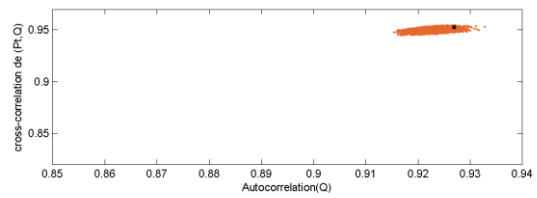
Du loup 1



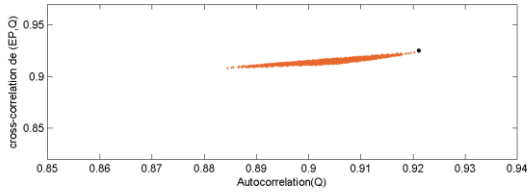
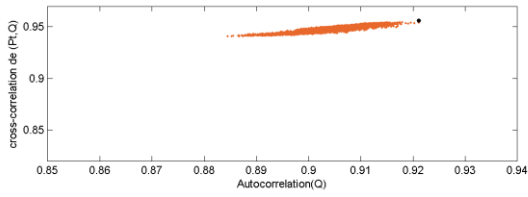
Du loup 2



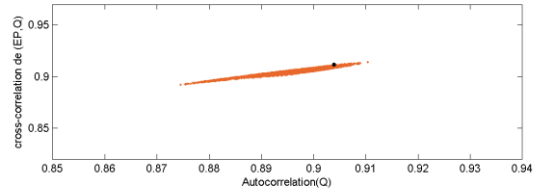
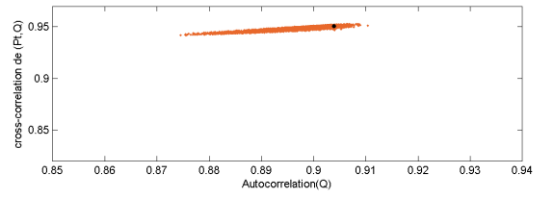
Du moulin



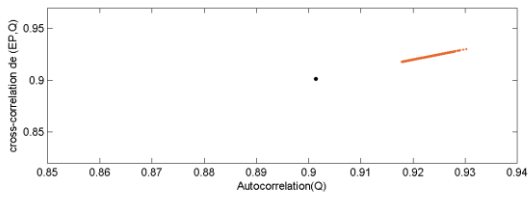
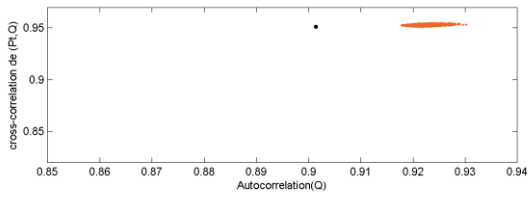
Du sud



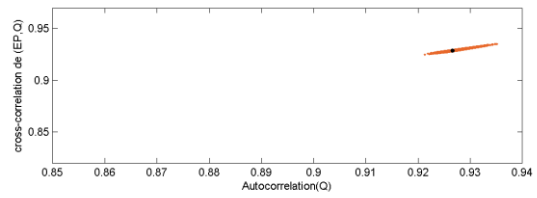
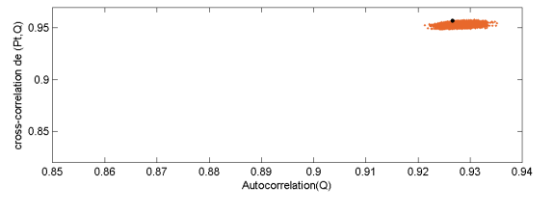
Dumoine



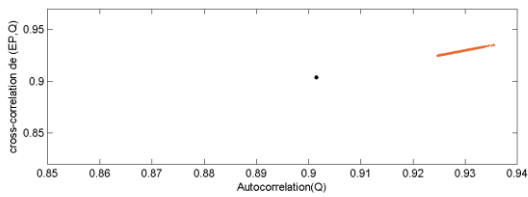
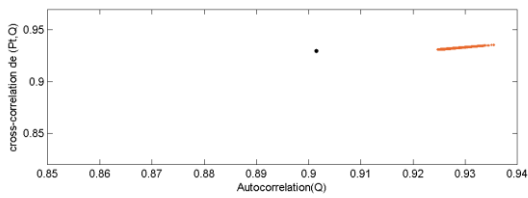
Eaton



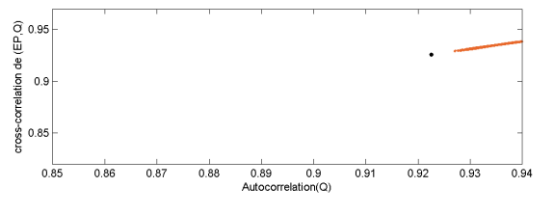
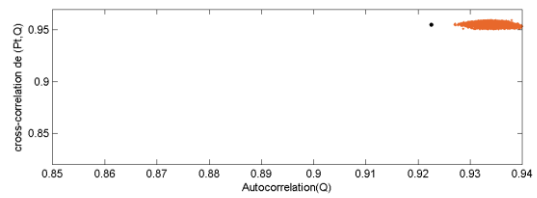
Ecorces



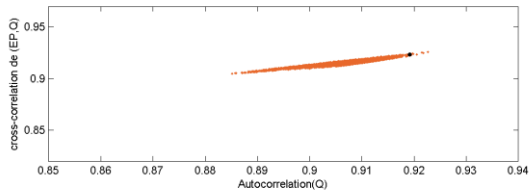
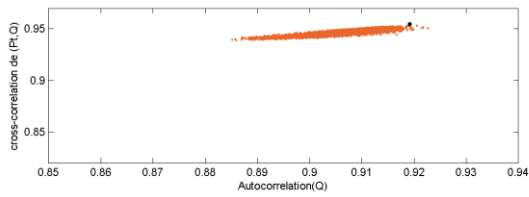
Etchemin



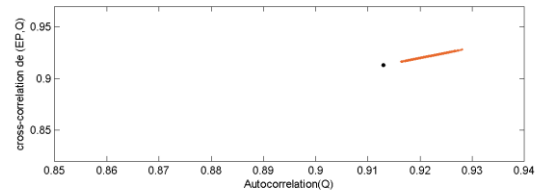
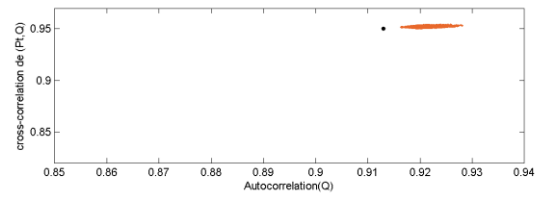
Ewing



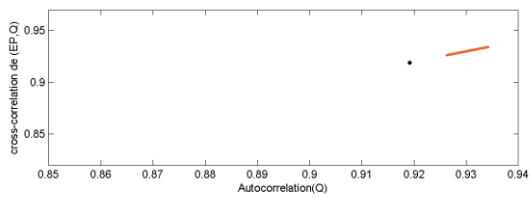
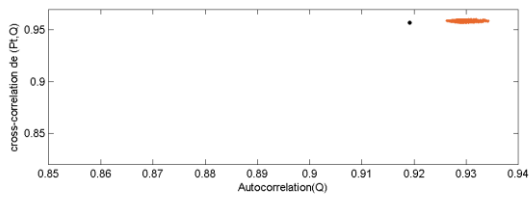
Famine



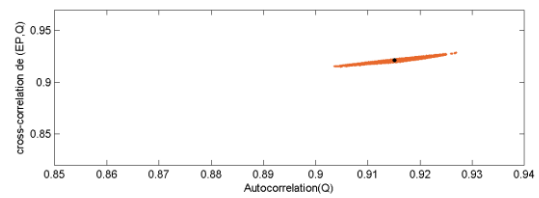
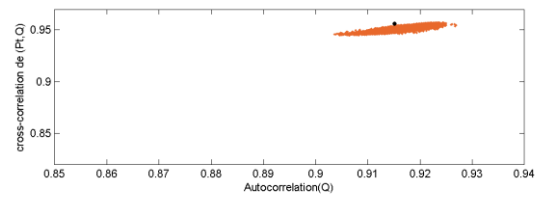
Gatineau



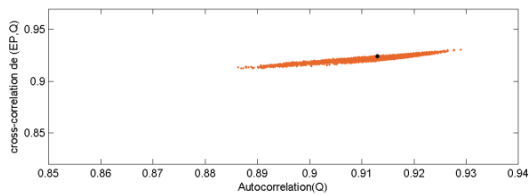
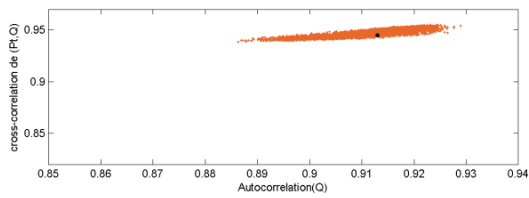
Jacques cartier



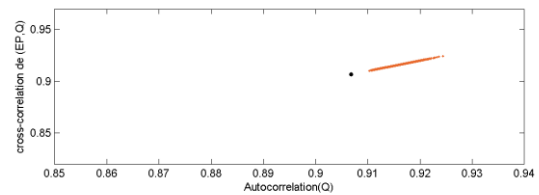
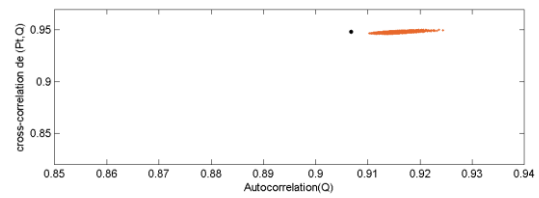
Harricana



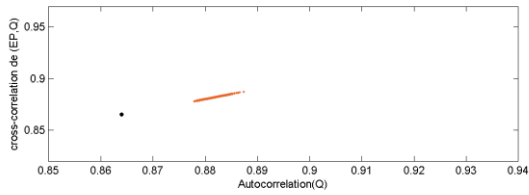
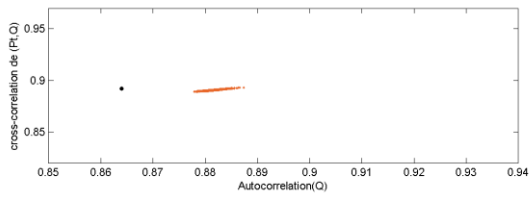
Kinojevis



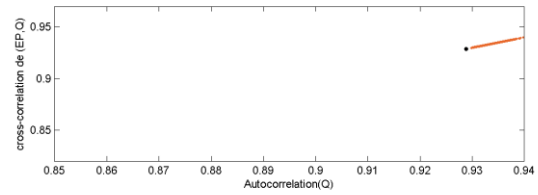
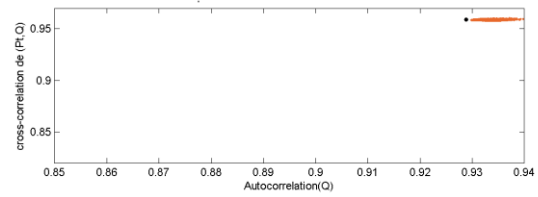
L'acadie



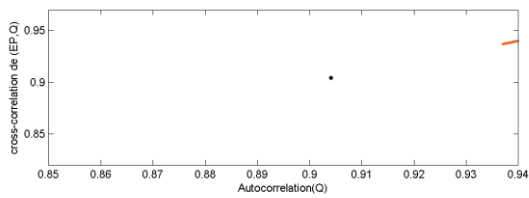
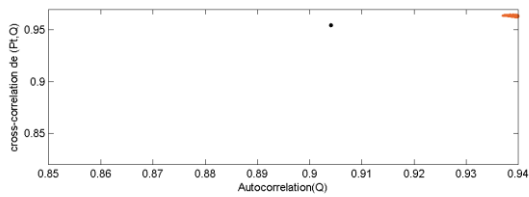
L'assumption



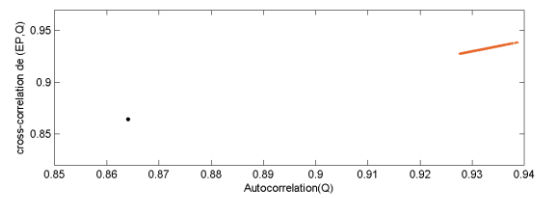
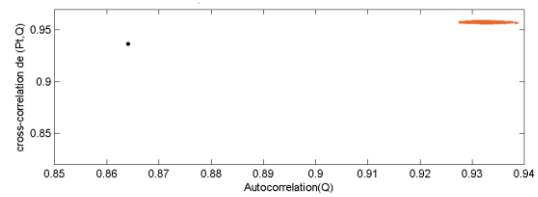
La chevrotiere



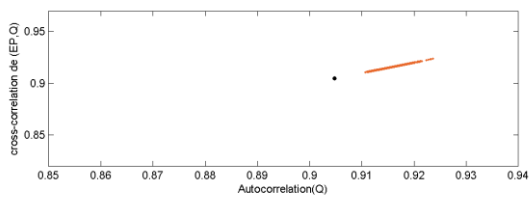
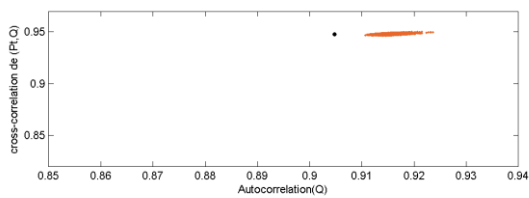
Malbaie



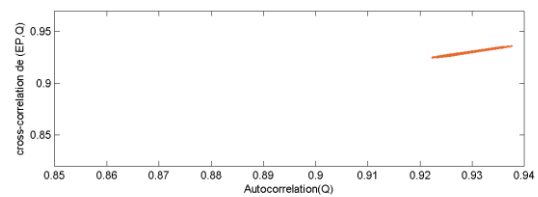
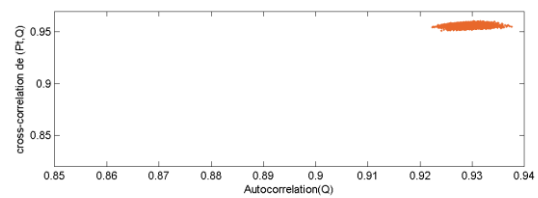
Moisie



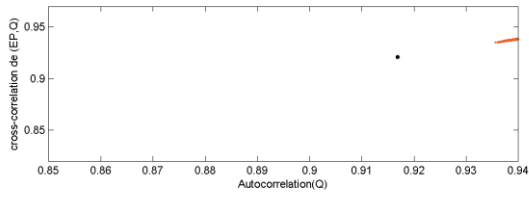
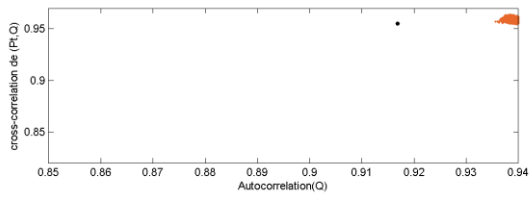
Maskinonge



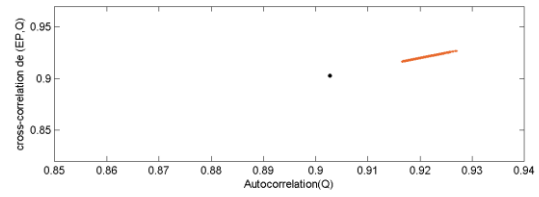
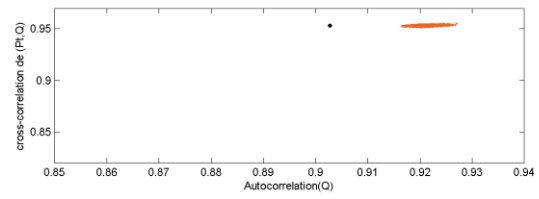
Mastigouche



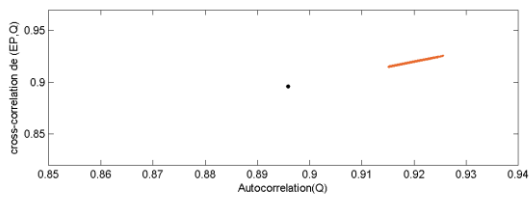
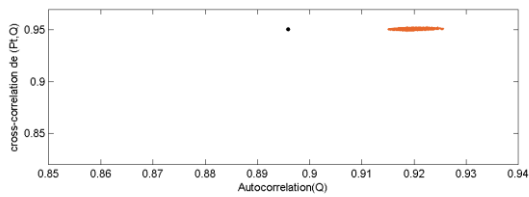
Matane



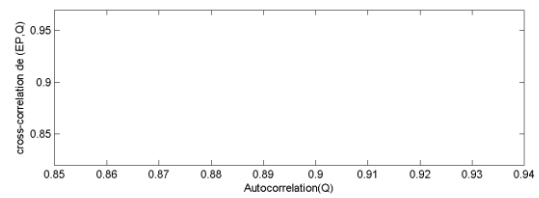
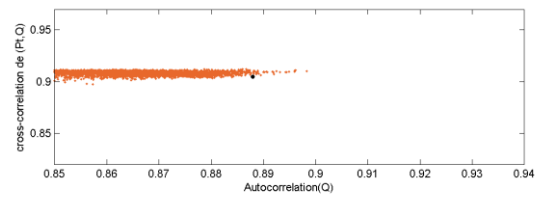
Matapedia



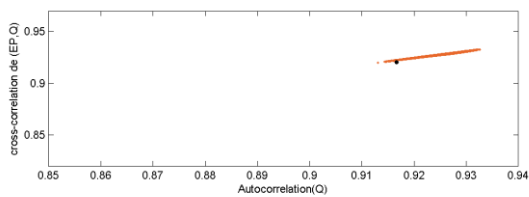
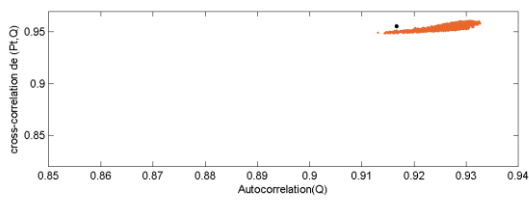
Matawin



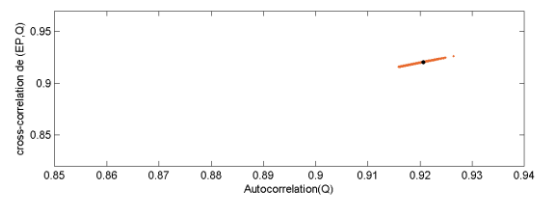
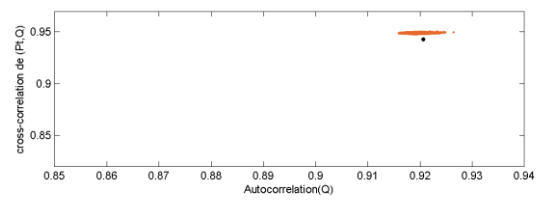
Metabetchouane



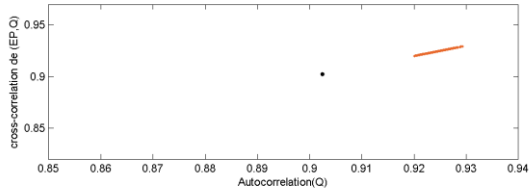
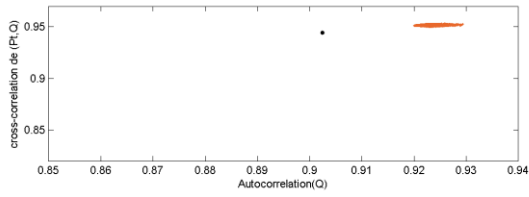
Mistassibi



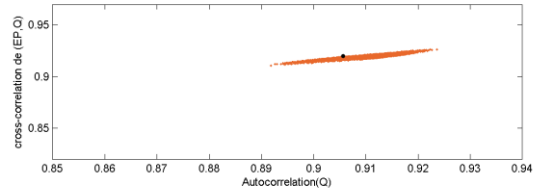
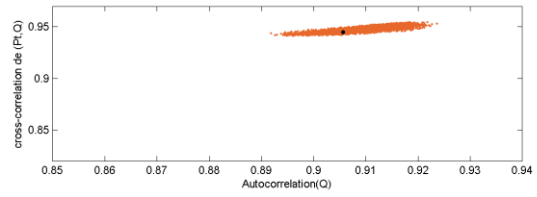
Mistassini



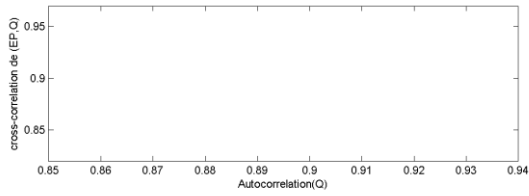
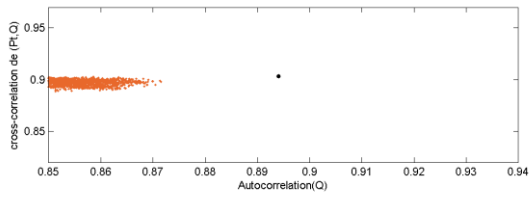
Montmorency 1



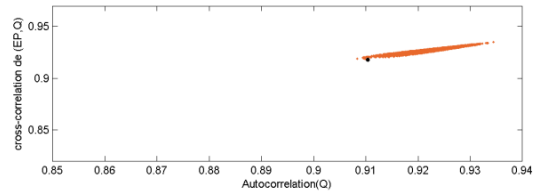
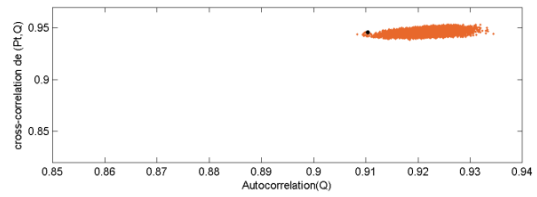
Montmorency 2



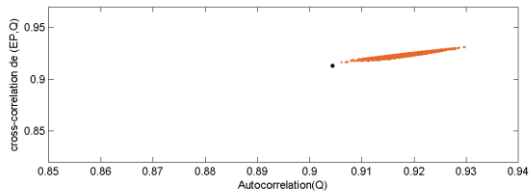
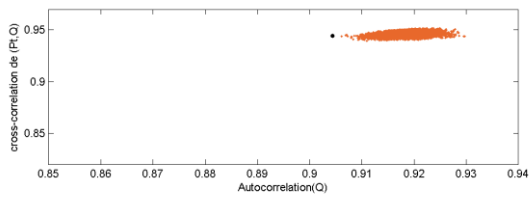
Morpions



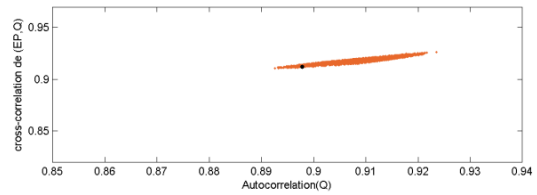
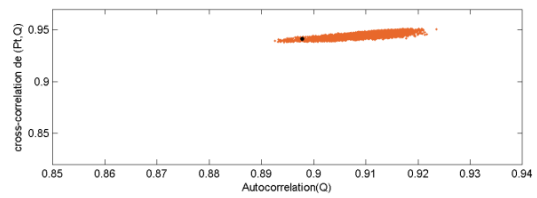
Nelson



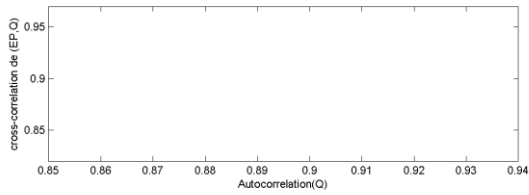
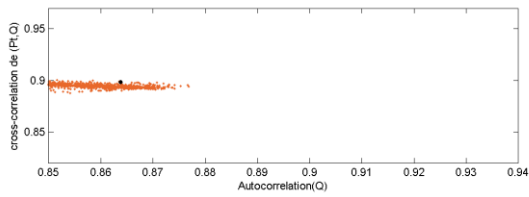
Nicolet



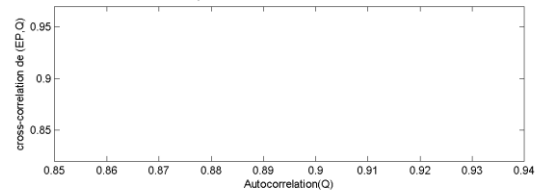
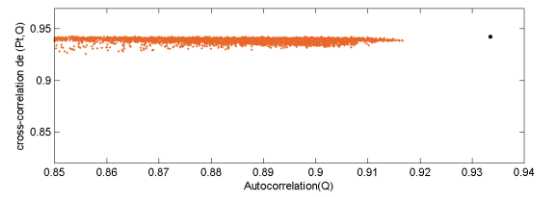
Nicolet sud-ouest



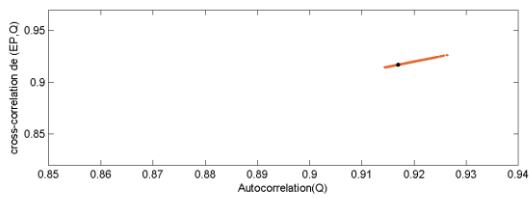
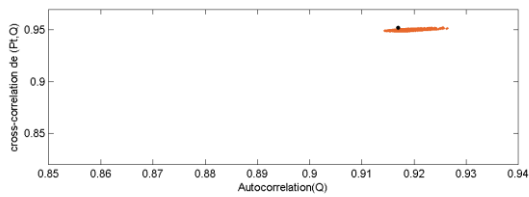
Noir 1



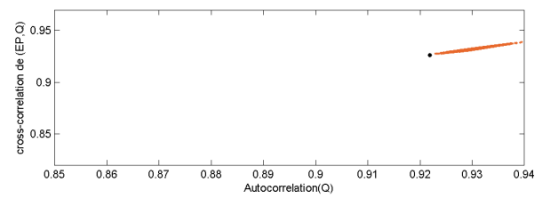
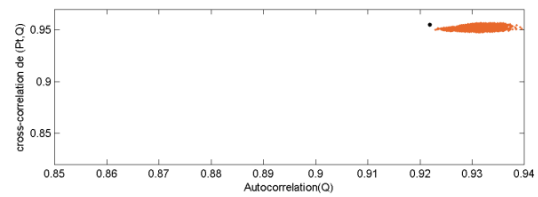
Noire 2



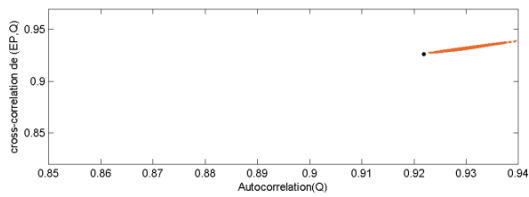
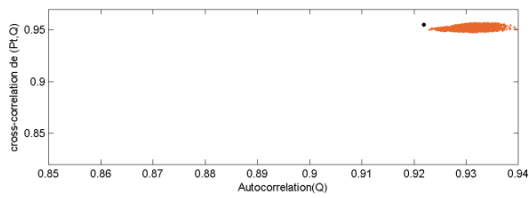
Nouvelle



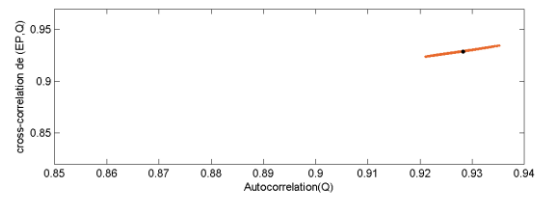
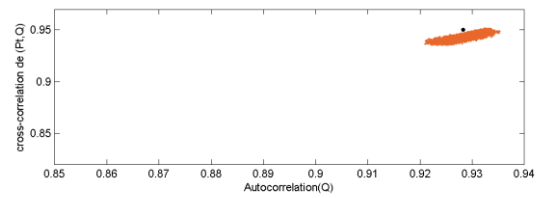
Ouareau



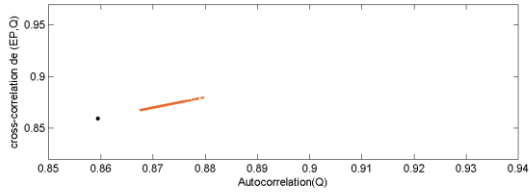
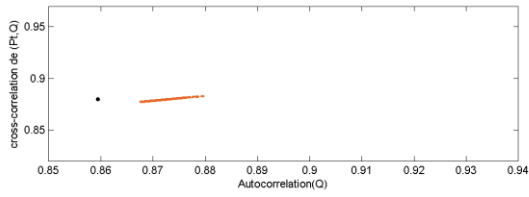
Ouelle



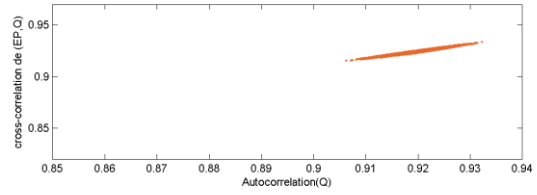
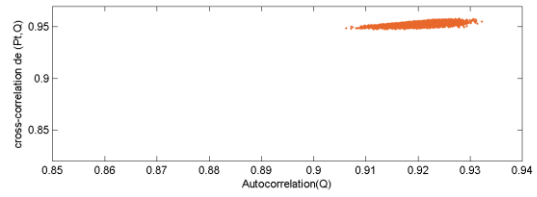
Petit Saguenay



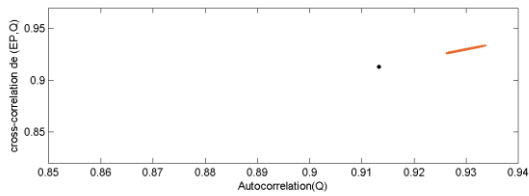
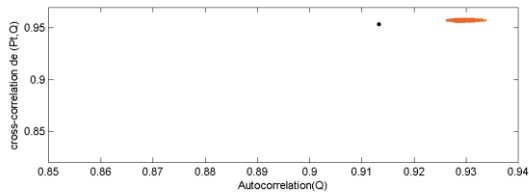
Petite Riviere Cascapedia



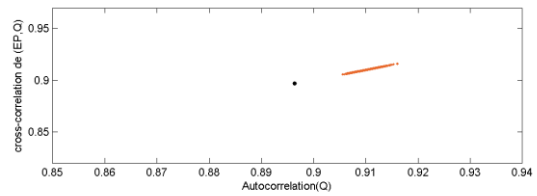
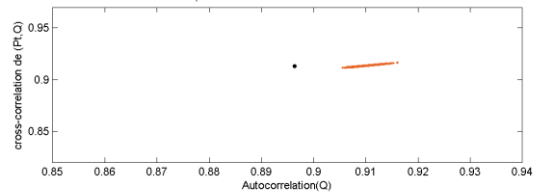
Petite Riviere Du Chene



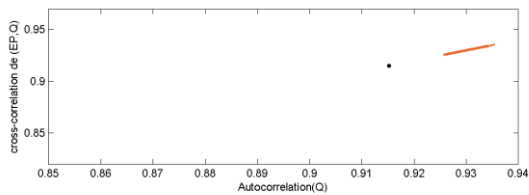
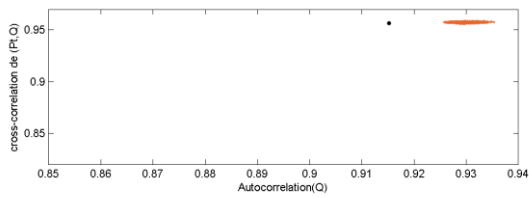
Petite Riviere Neigette



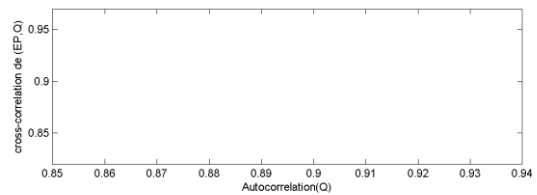
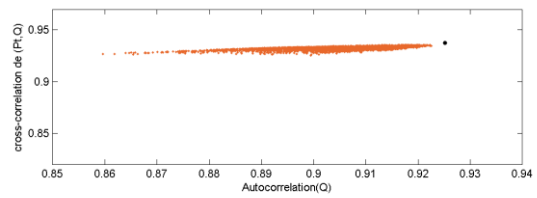
Petite Riviere Peribonka



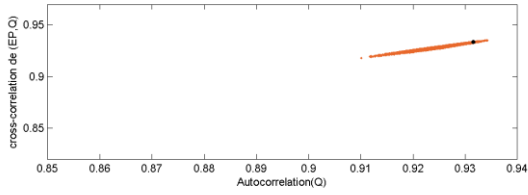
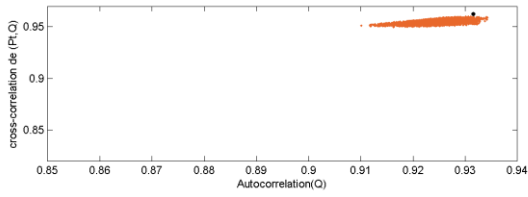
Picanoc



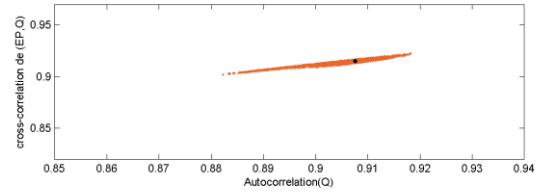
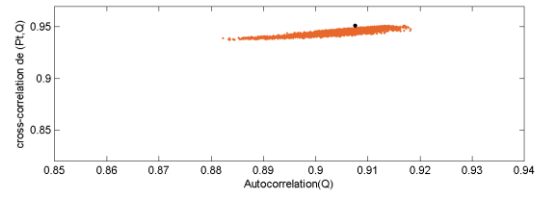
Pikauba 1



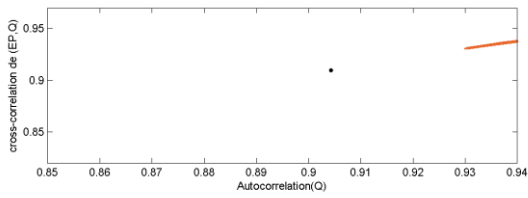
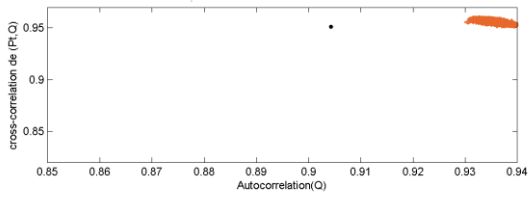
Portneuf



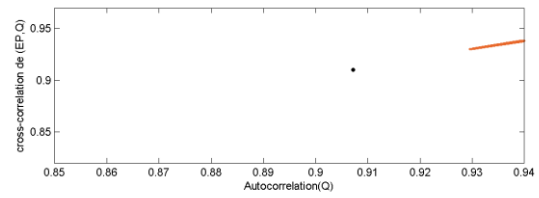
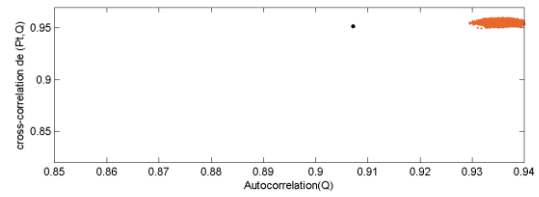
Rimouski



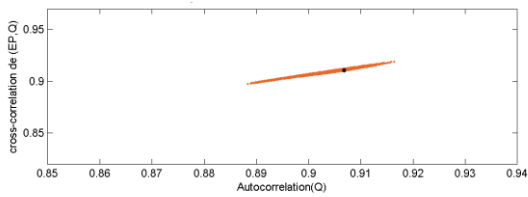
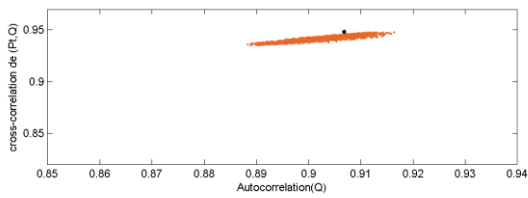
Rouge 1



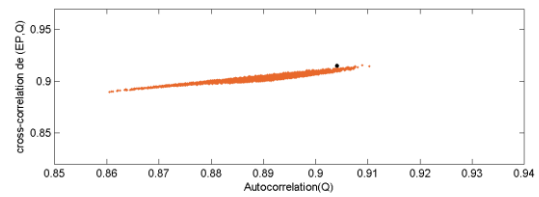
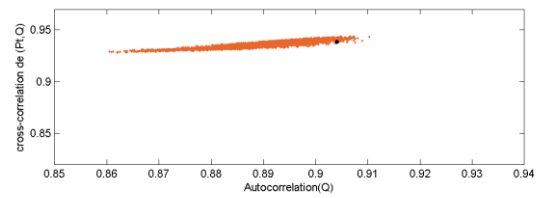
Saint louis



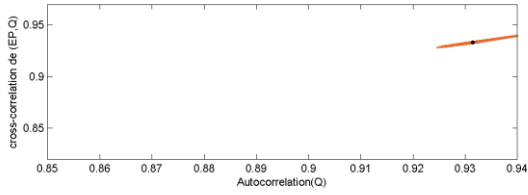
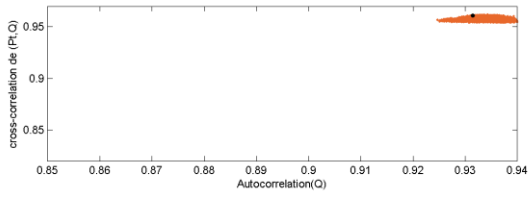
Sainte Anne 1



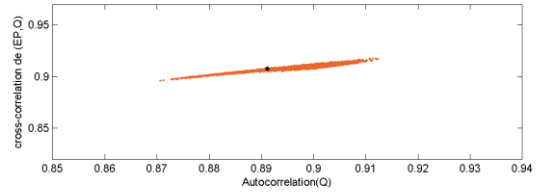
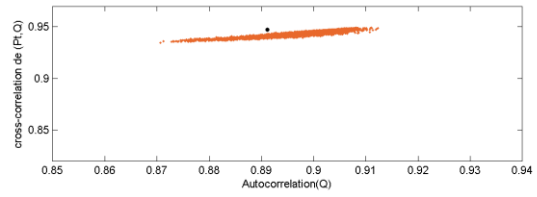
Sainte Anne 2



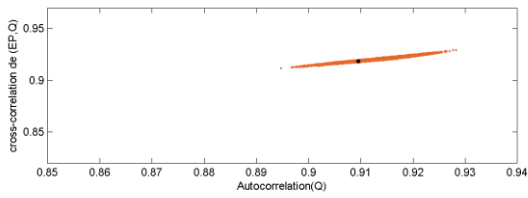
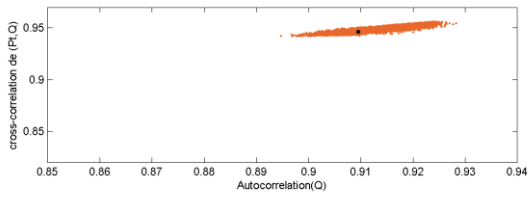
Suffolk



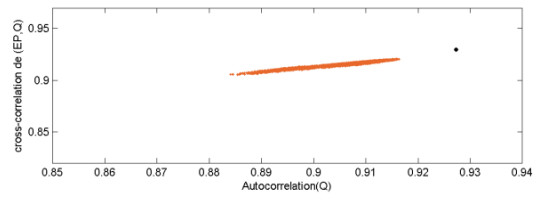
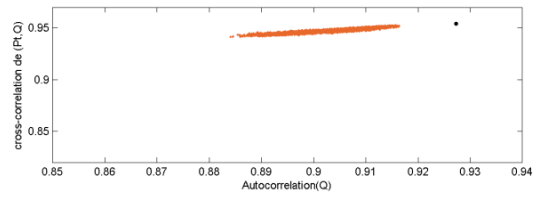
Trois pistoles



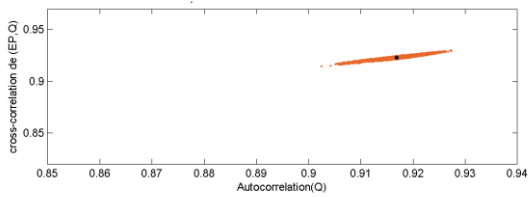
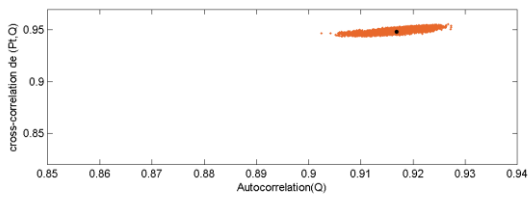
Vermillon



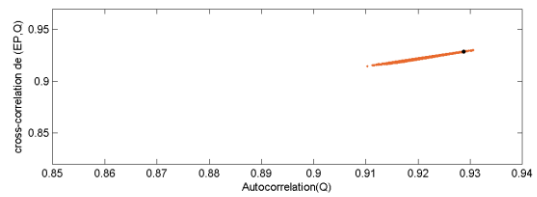
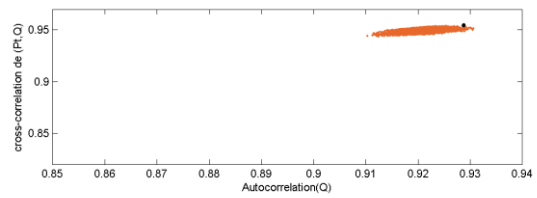
Yamaska



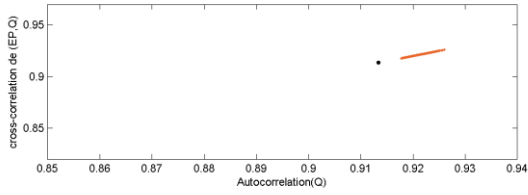
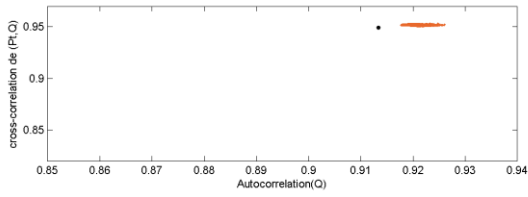
Yamaska Nord 1



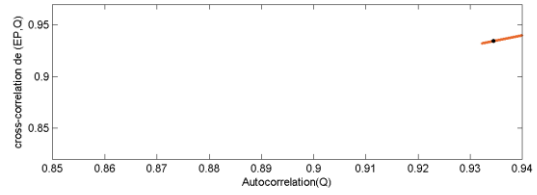
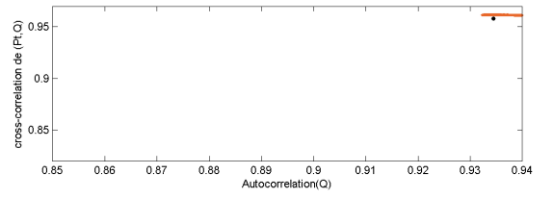
Yamaska Nord 2



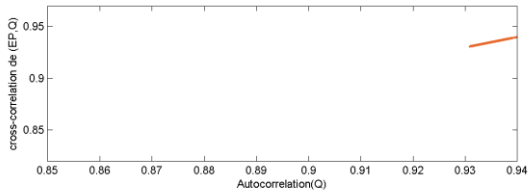
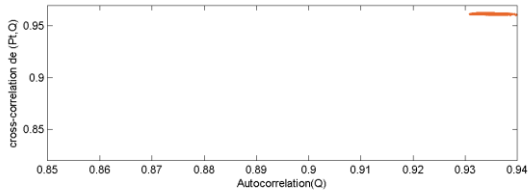
York



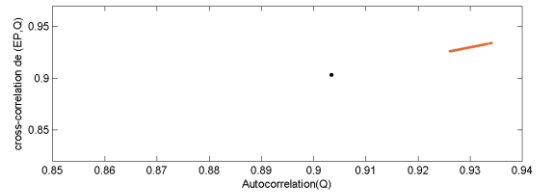
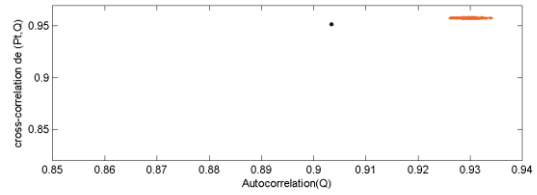
Valin



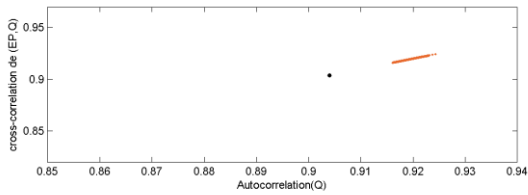
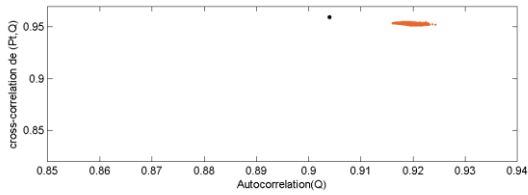
Waswanipi



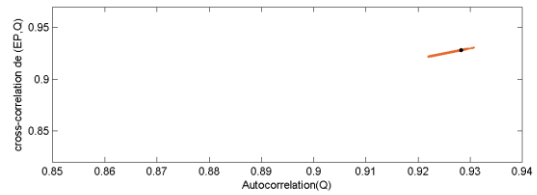
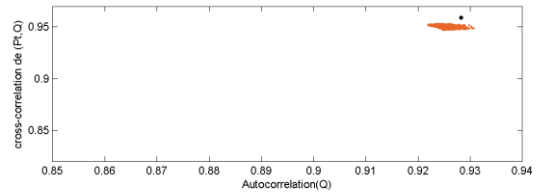
Saint Paul



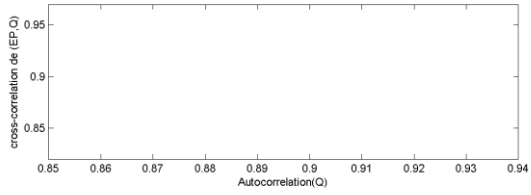
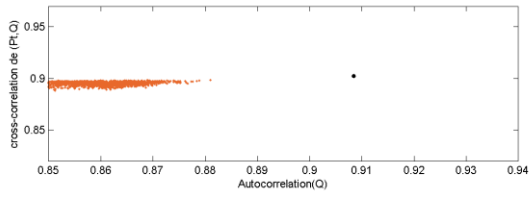
Sainte Marguerite Nord Est



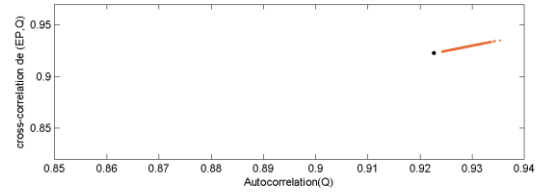
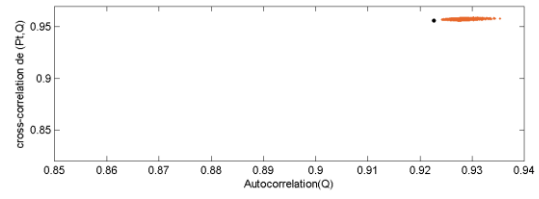
Pontax



Nastapoca



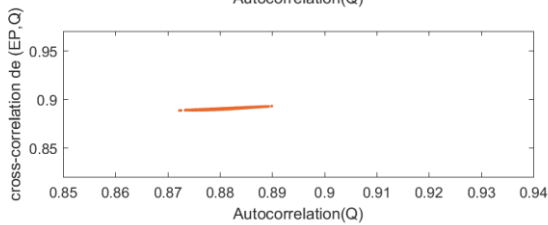
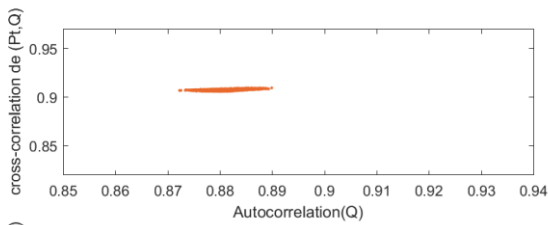
George



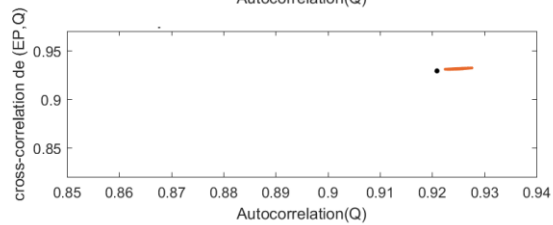
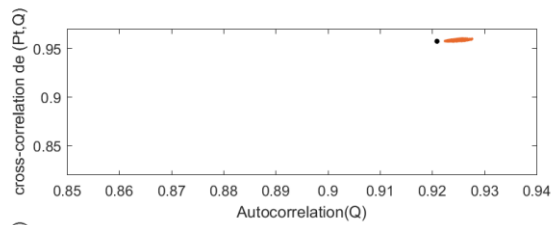
Godbout

Annexe I : LES RESULTATS DE L'APPLICATION DE LA METHODE DE COVARIANCE SUR LE MODÈLE MOHYSE

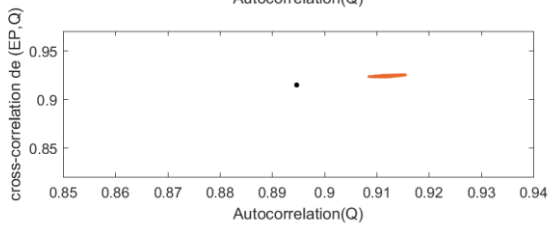
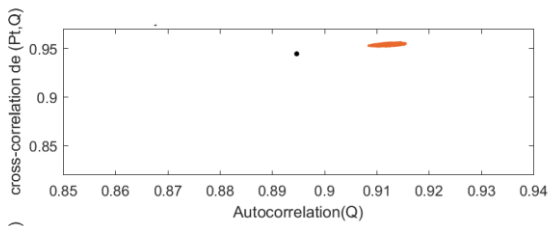
Cette section présente les figures ayant permis la validation par la méthode de la covariance du modèle MOHYSE pour les 126 Bassins versants utilisés dans cette étude :



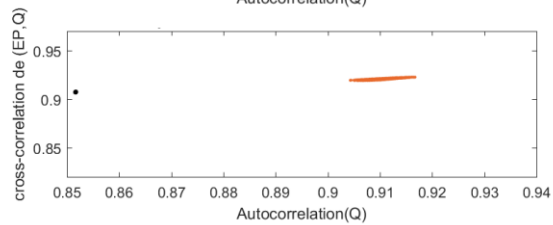
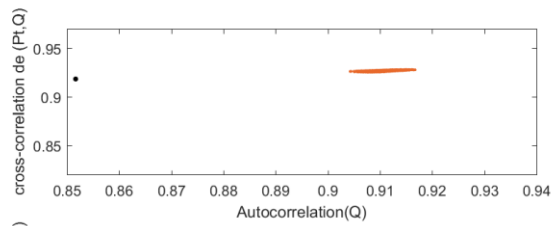
A l'ours



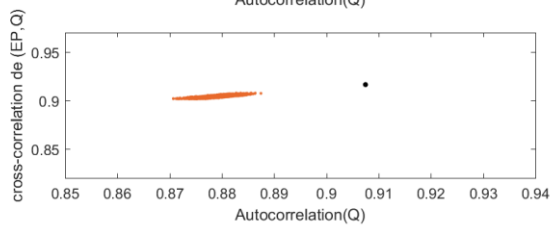
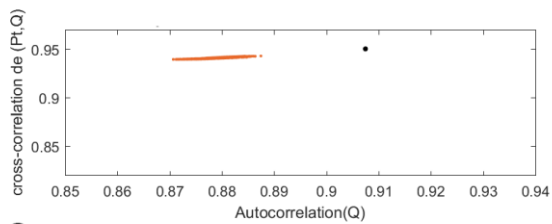
Ashuapmushuan



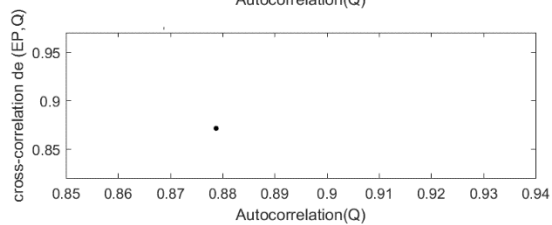
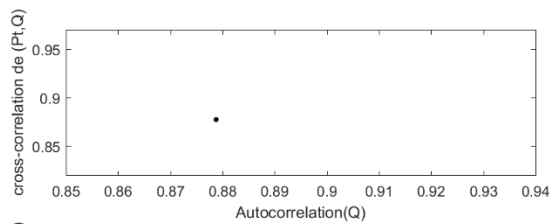
Au saumon



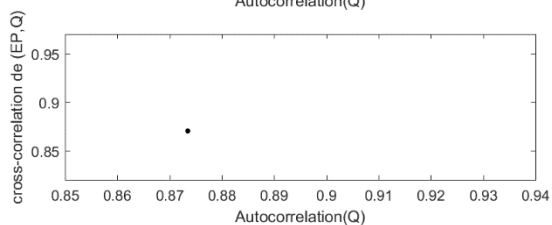
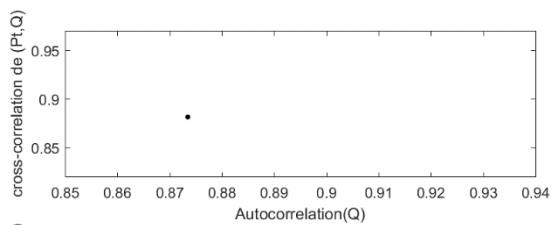
Aux_Brochets



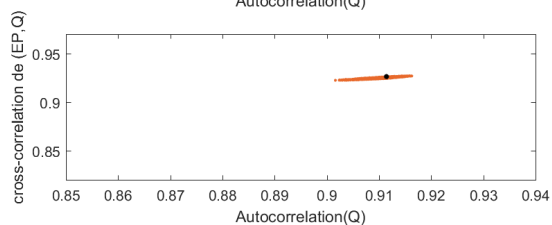
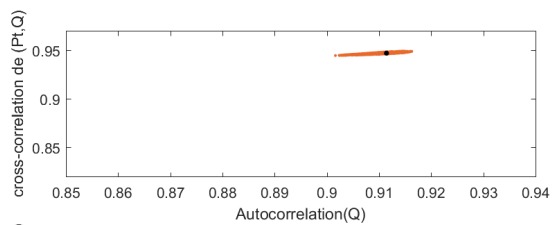
A la Baleine



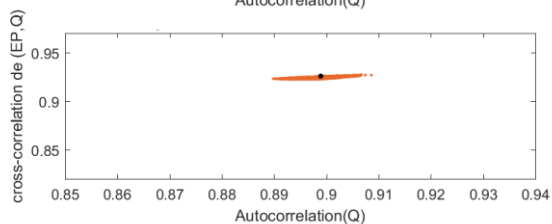
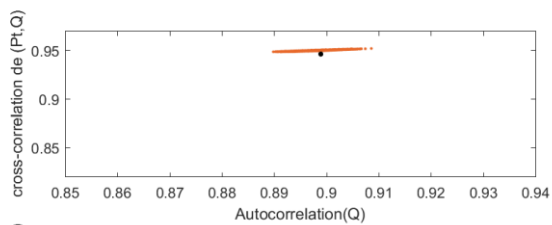
Aux Feuilles



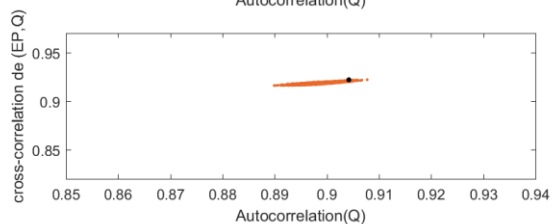
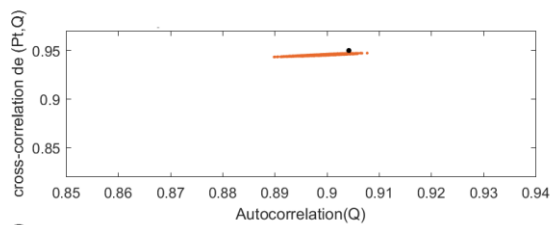
Aux_Melezes



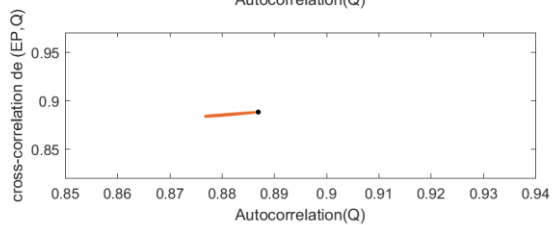
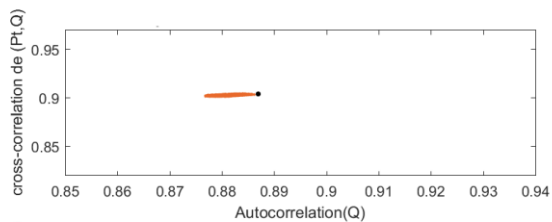
Aux_Pommes



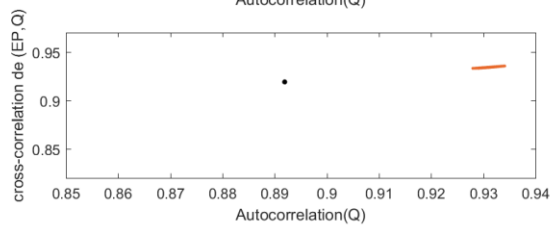
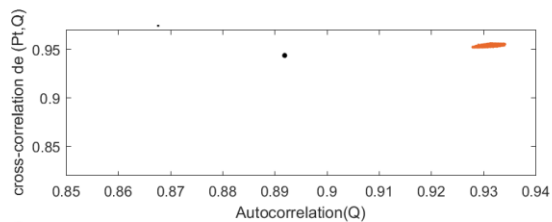
Aux_Saumons



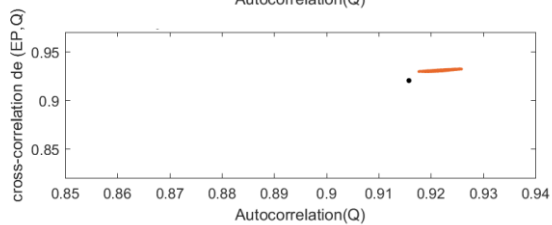
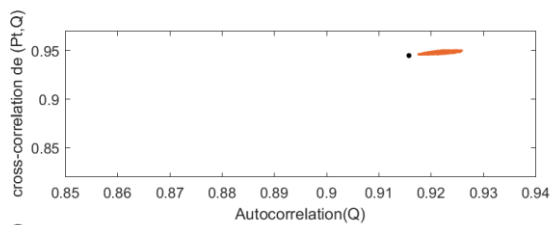
Batiscan



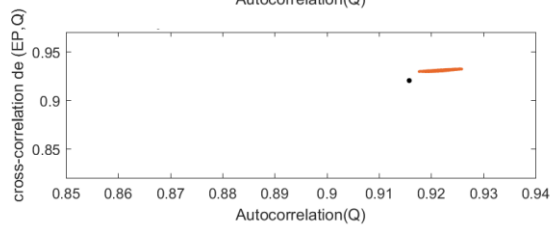
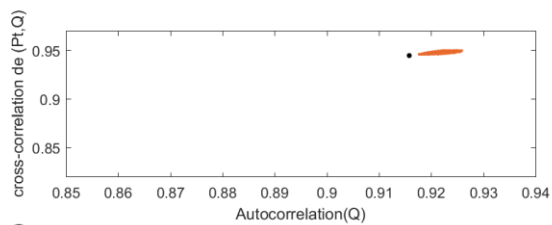
Beauport



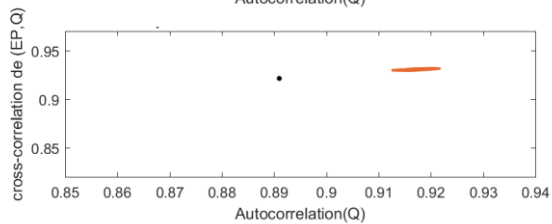
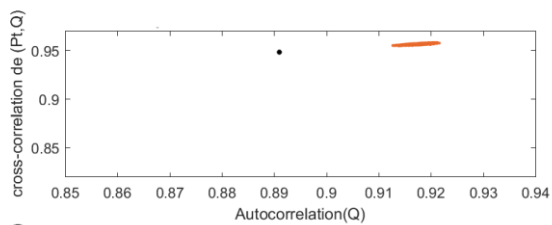
Beaurivage



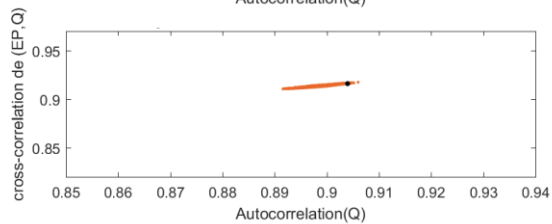
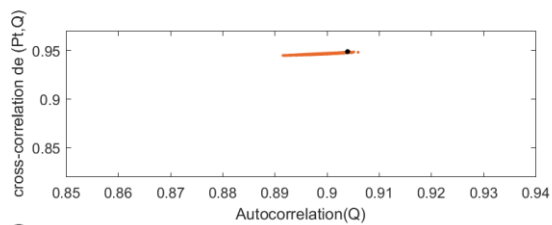
Becancour1



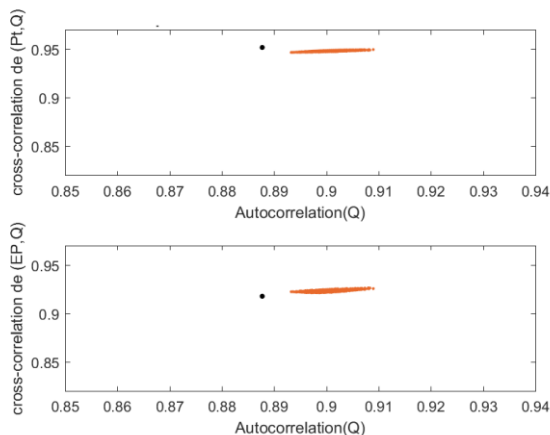
Becancour2



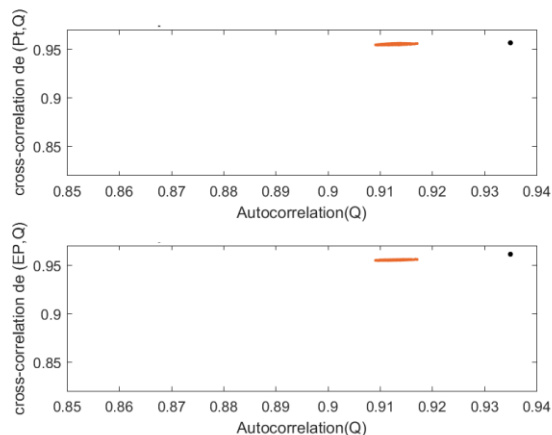
Bell



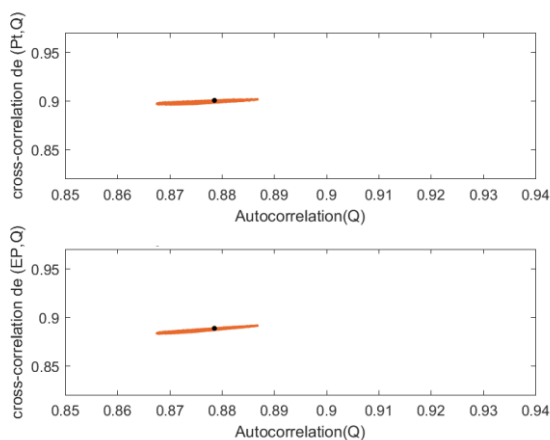
Bras du nord



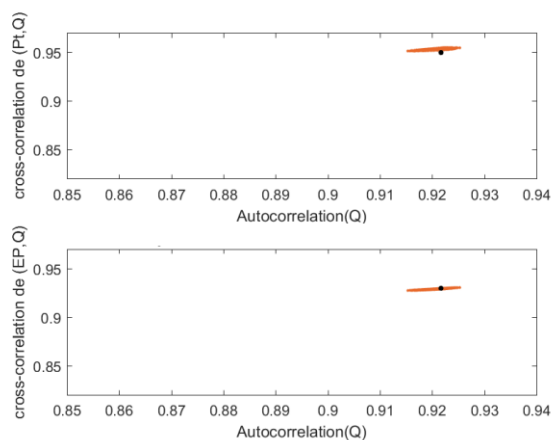
Belle_Riviere



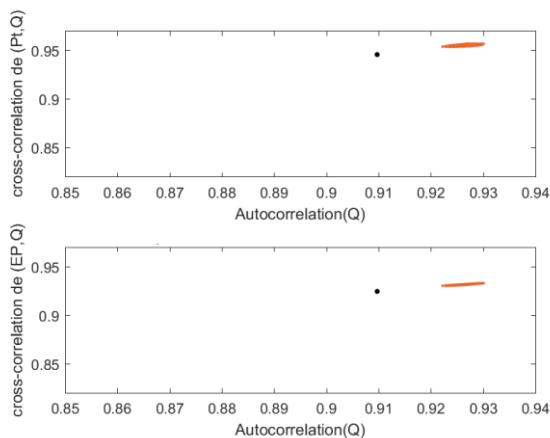
Bonaventure



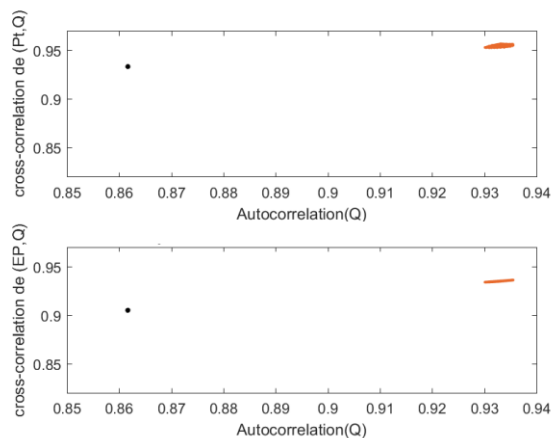
Bourbon



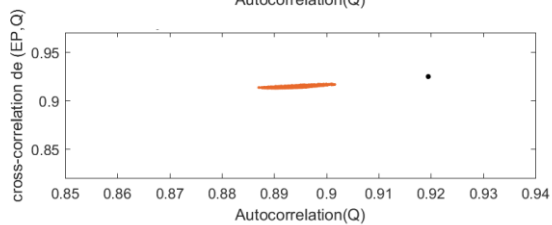
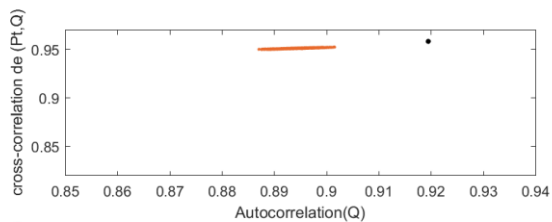
Boyer



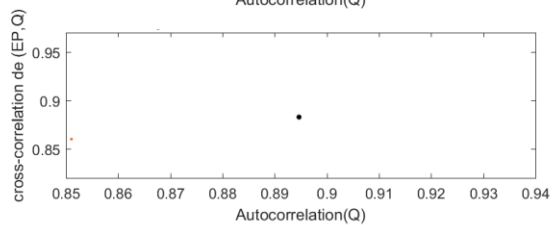
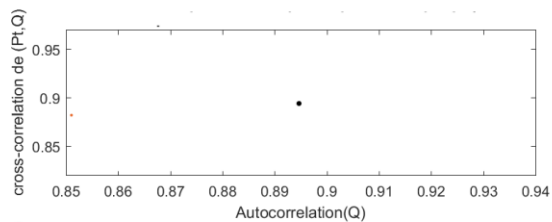
Boyer_Sud



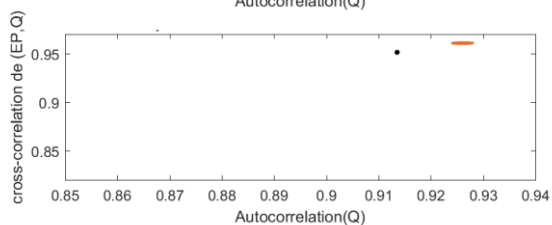
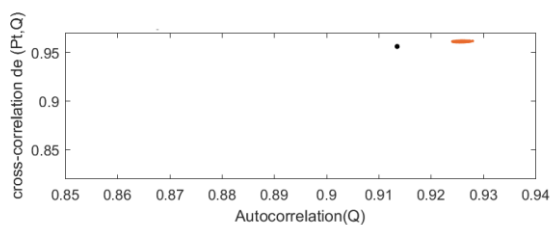
Bras_D_Henri



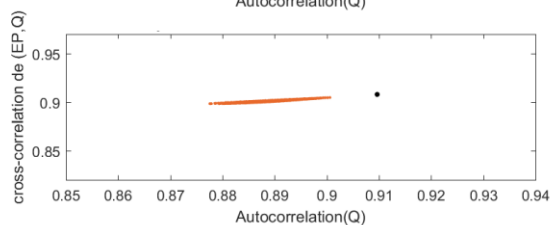
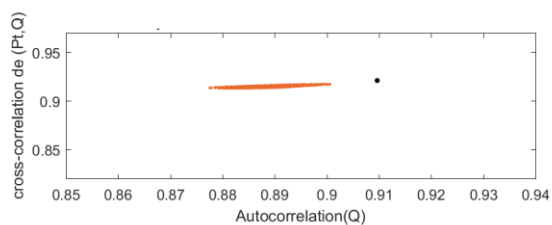
Broadback



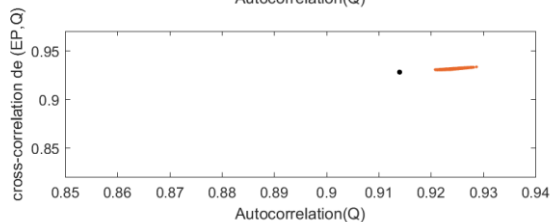
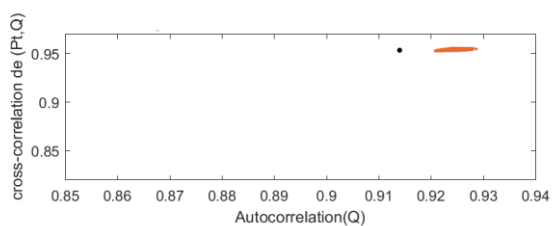
Caniapiscou



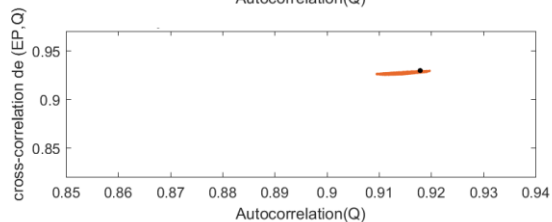
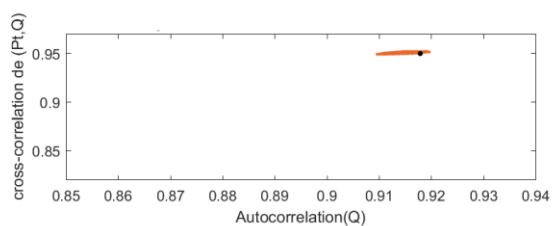
Cascapedia



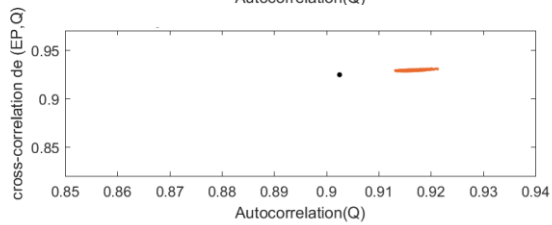
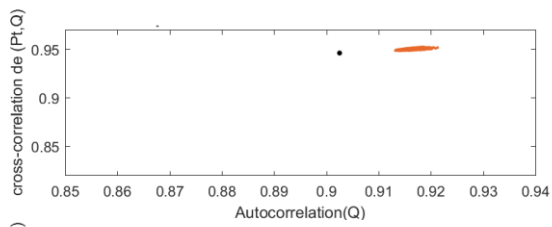
Chateauguay



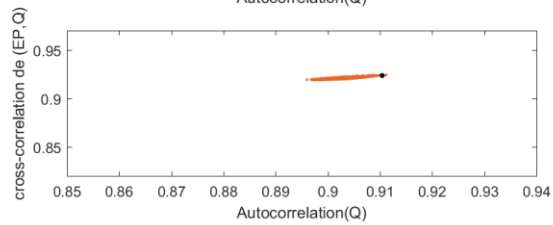
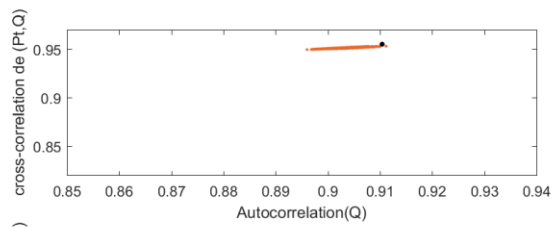
Chaudiere1



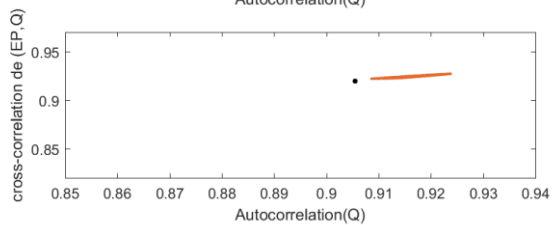
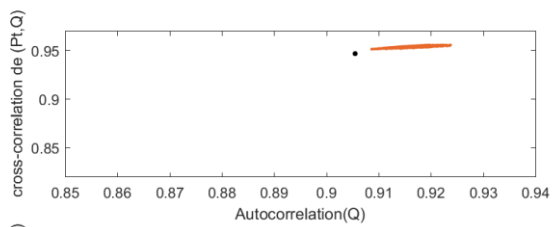
Chaudiere2



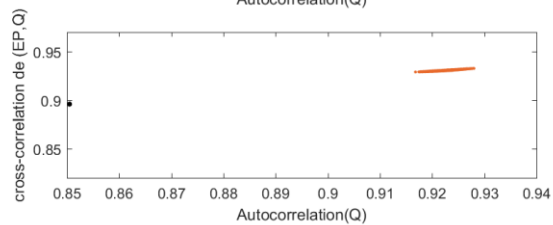
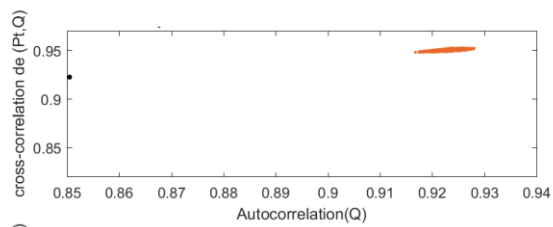
Coaticook



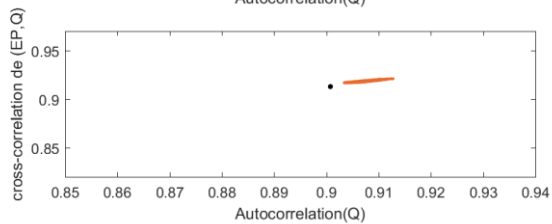
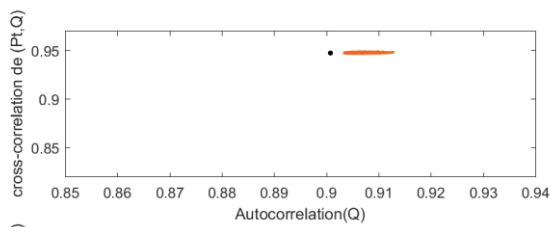
Cyriac



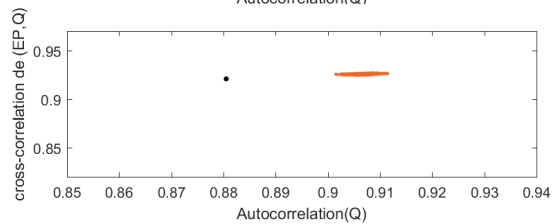
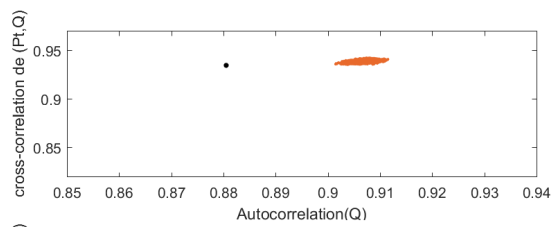
Croche



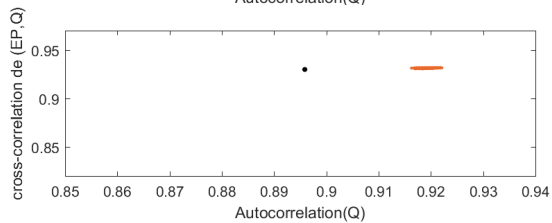
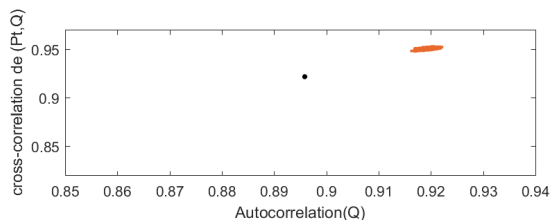
Dauphine



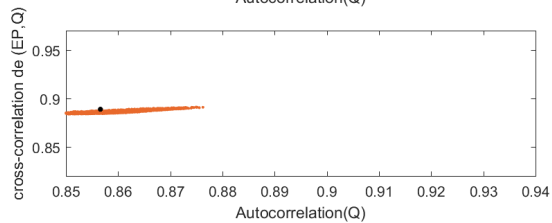
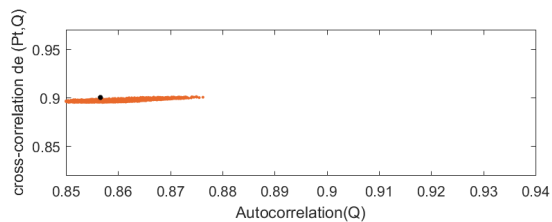
Dartmouth



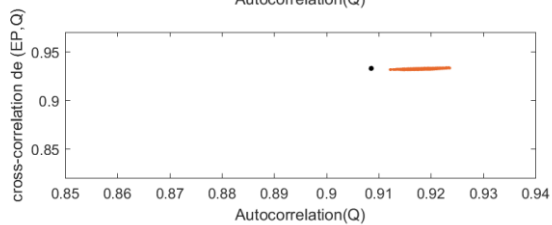
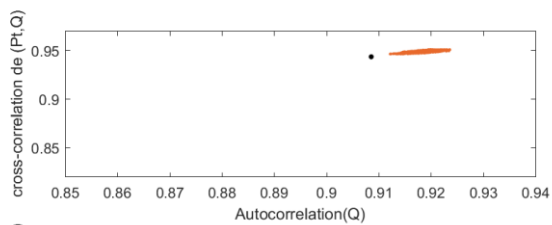
David



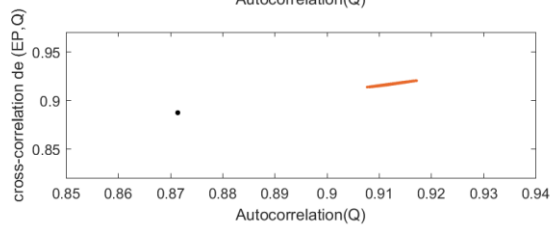
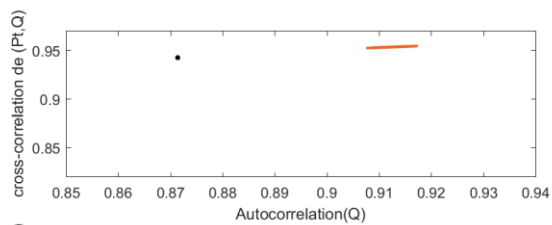
De la roche



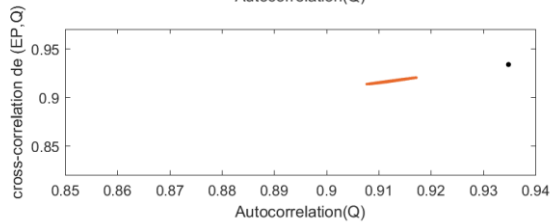
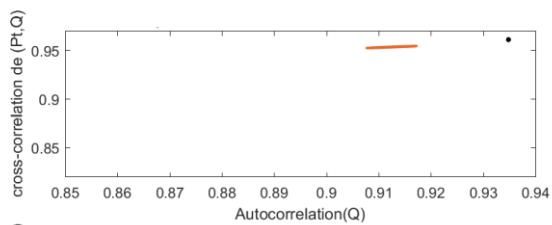
Des anglais 1



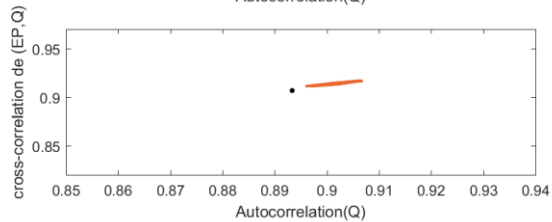
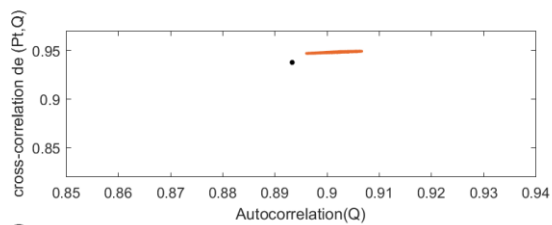
Des Anglais 2



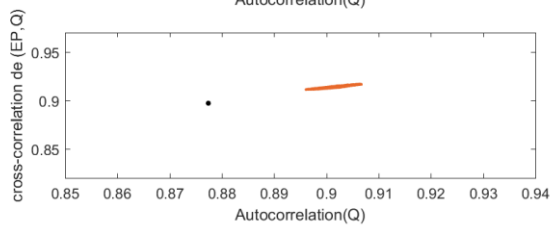
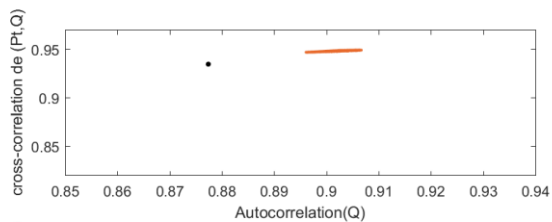
Des Aulnaies1



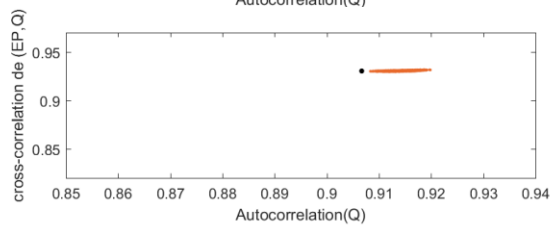
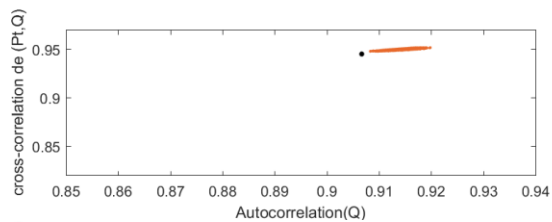
Des Aulnaies 2



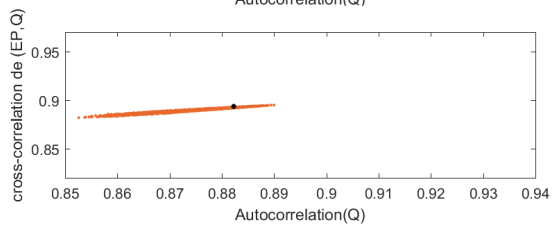
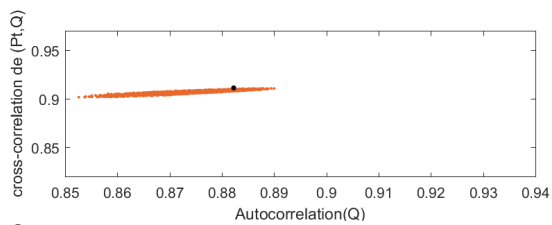
Des Eaux Volées 1



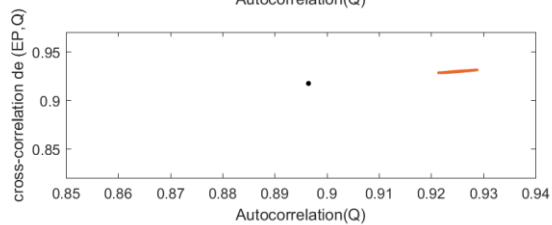
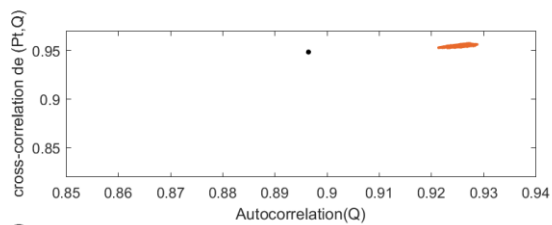
Des Eaux Volées 2



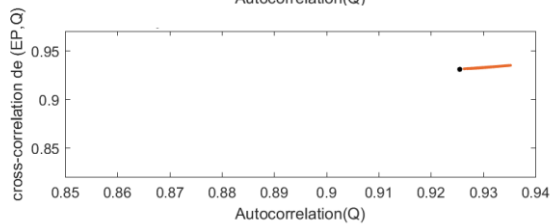
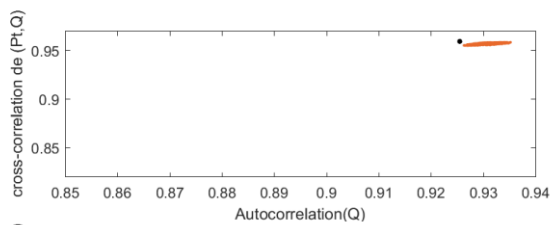
Des hurons 1



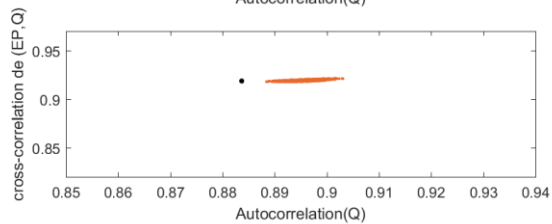
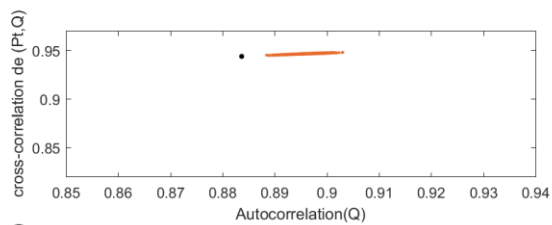
Désert



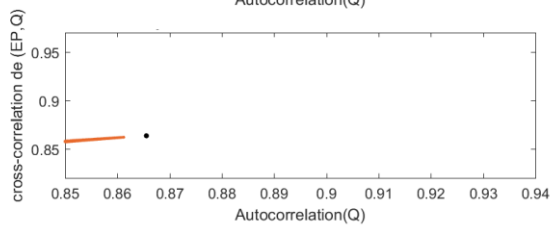
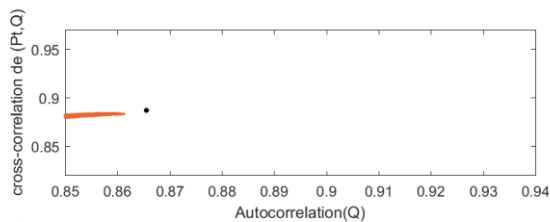
Doncaster



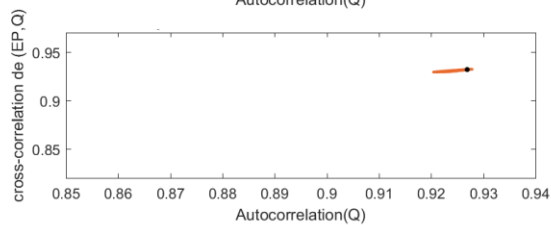
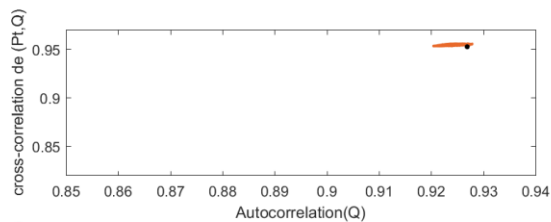
Du loup 1



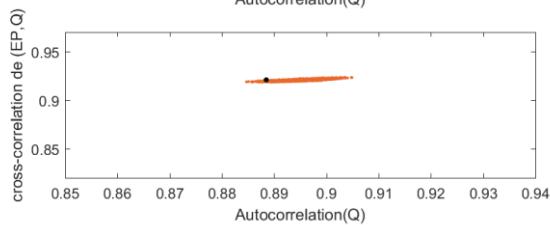
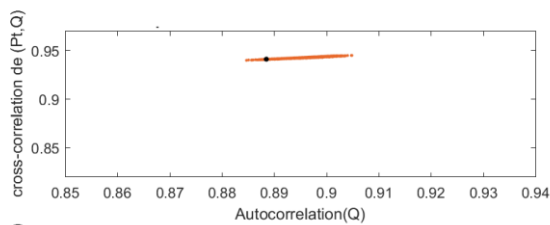
Du loup 2



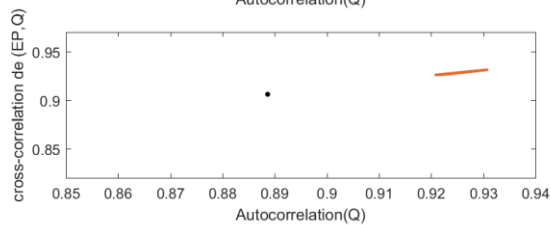
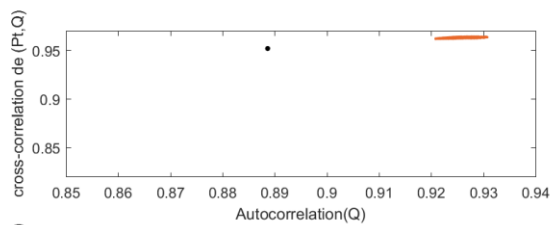
Du moulin



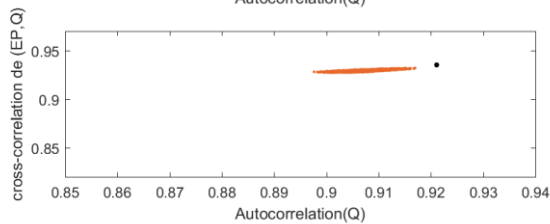
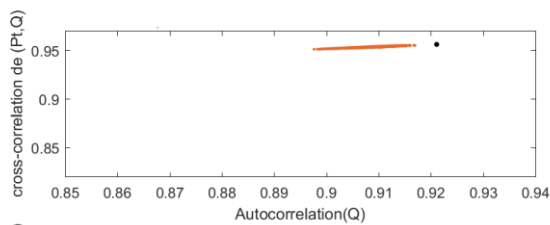
Du sud



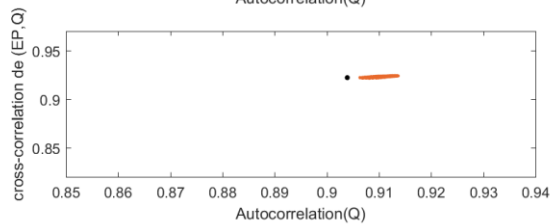
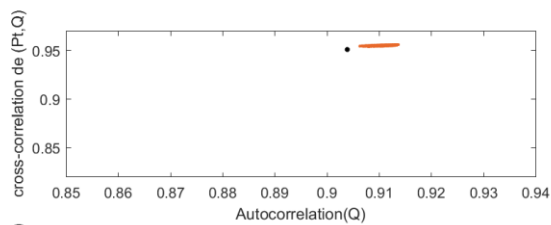
De L'achigan



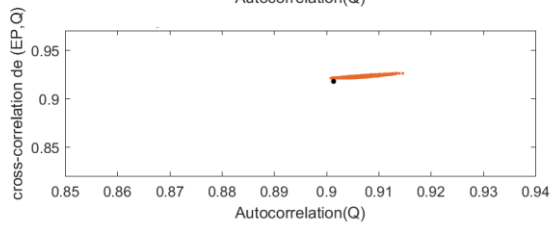
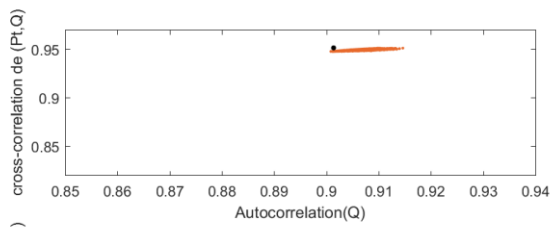
Du Petit Mecatina



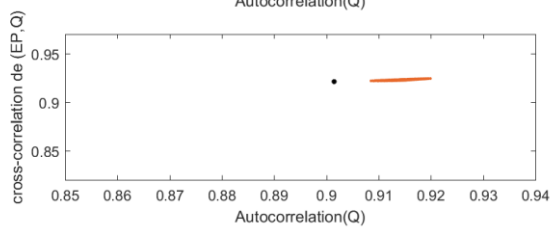
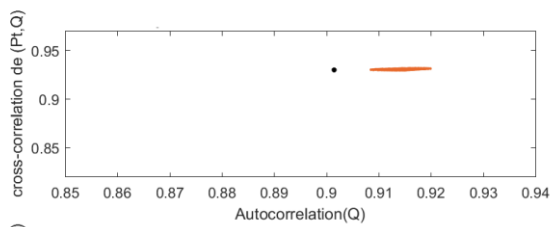
Dumoine



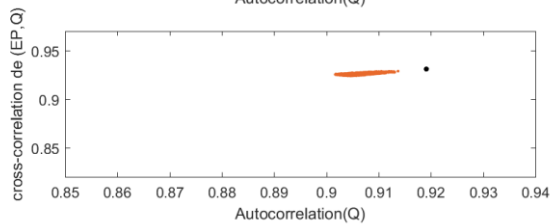
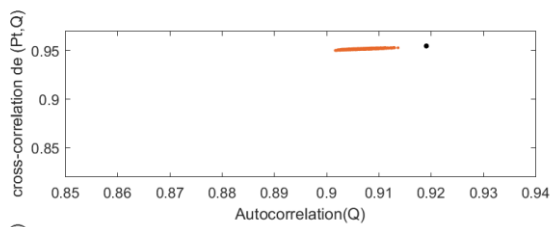
Eaton



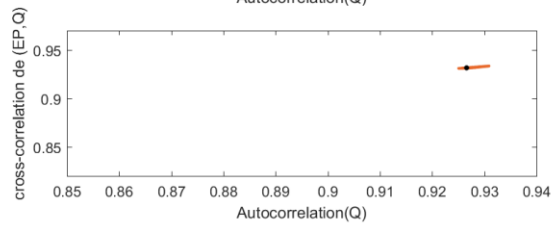
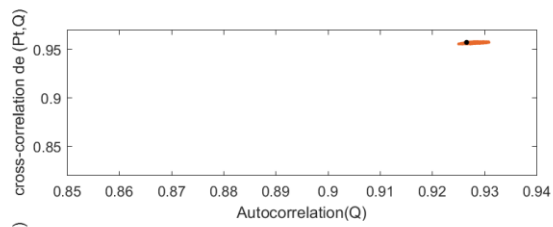
Ecorces



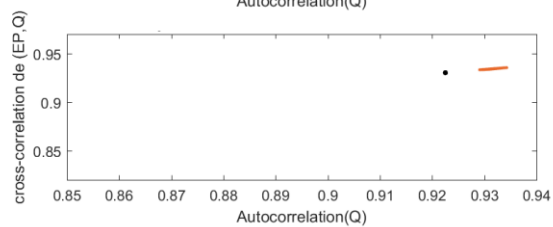
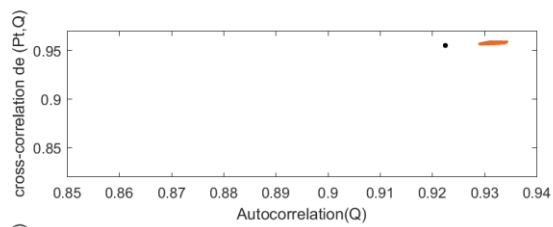
Ewing



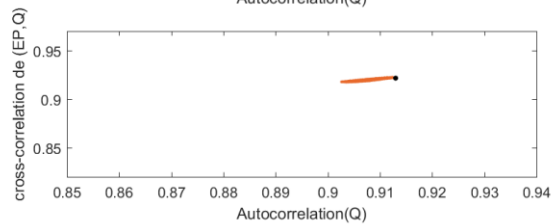
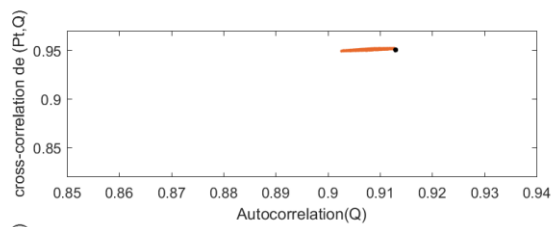
Gatineau



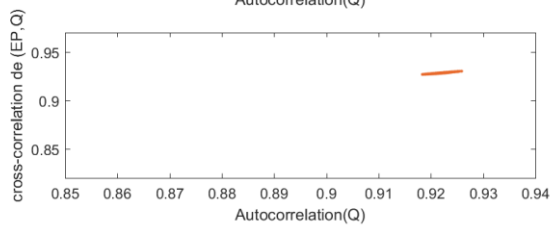
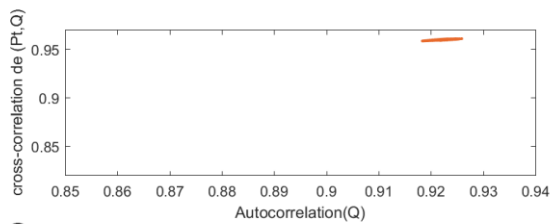
Etchemin



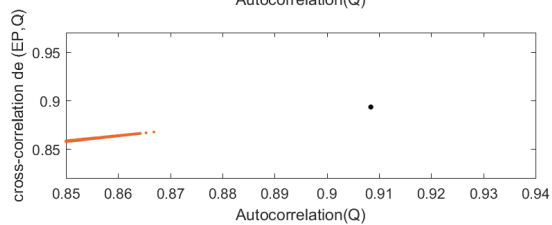
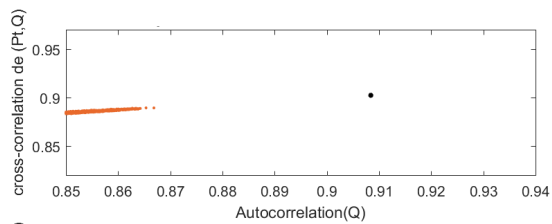
Famine



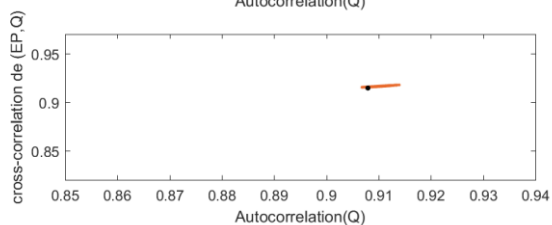
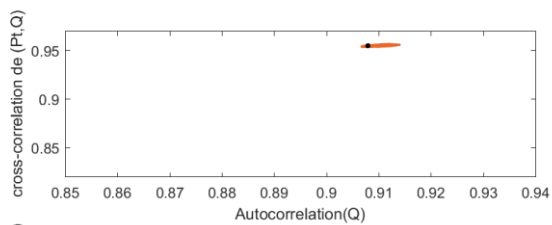
Jacques cartier



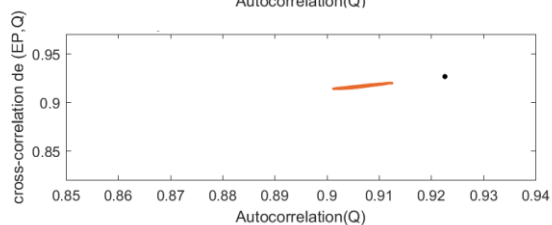
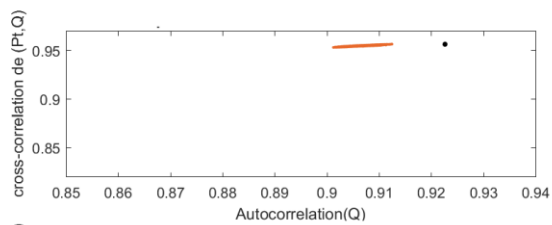
Escoumins



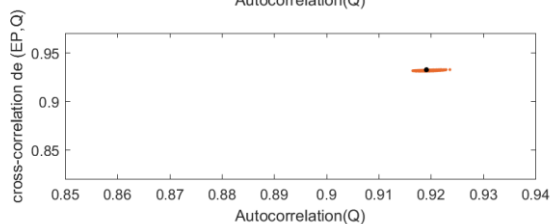
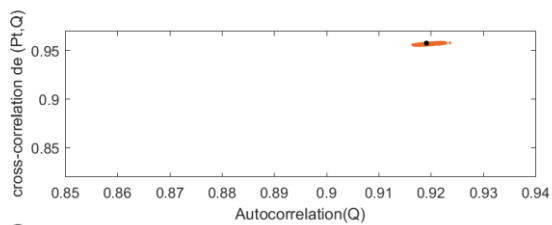
George



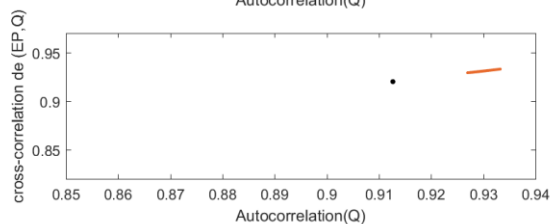
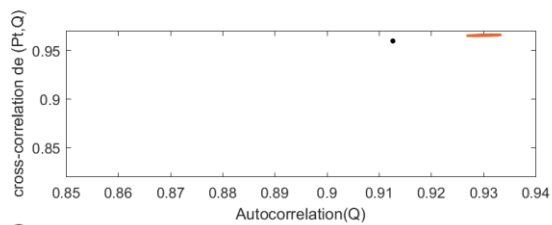
Grand Rivière de la Baleine



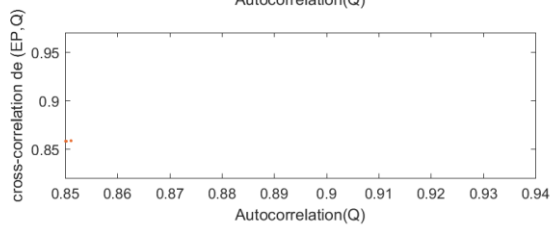
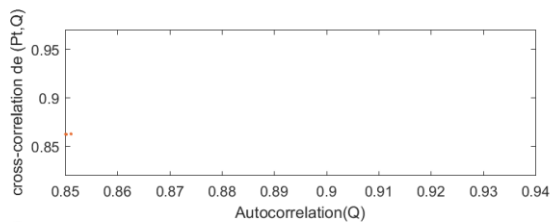
Godbout



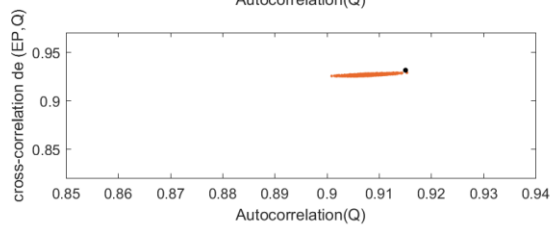
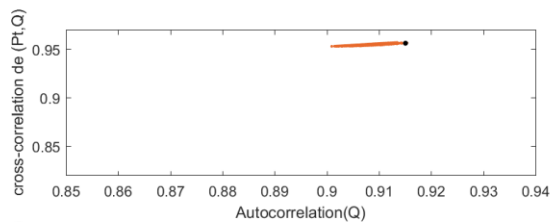
Harricana



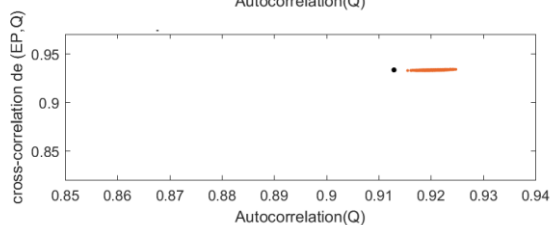
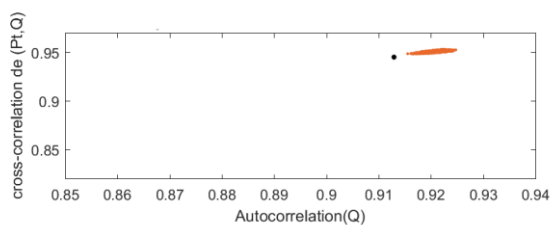
Magpie



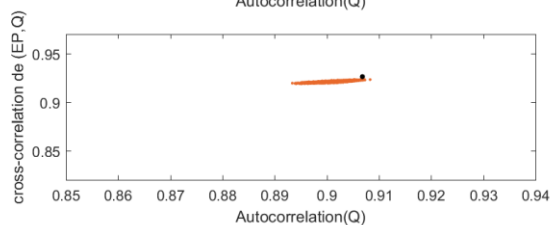
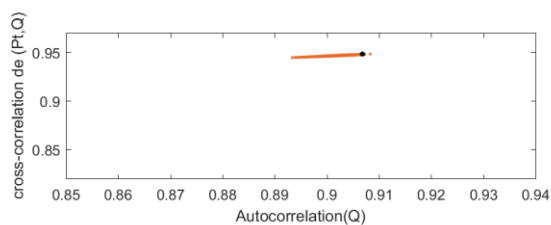
Kamouraska



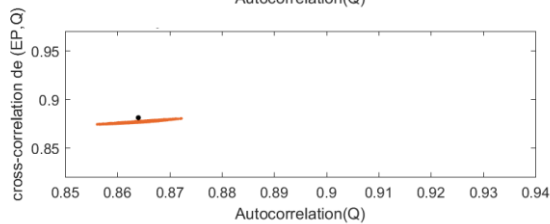
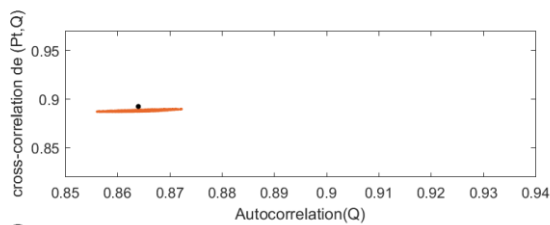
Kinojevis



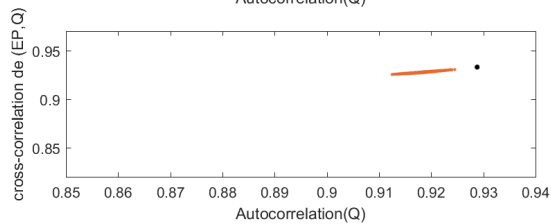
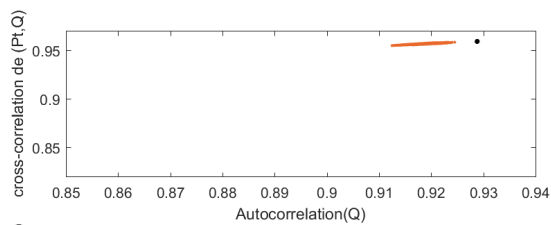
L'acadie



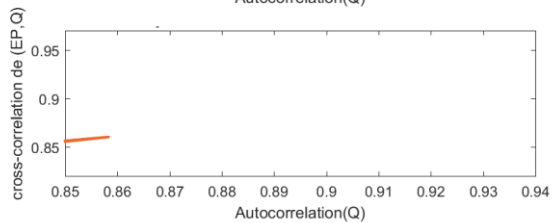
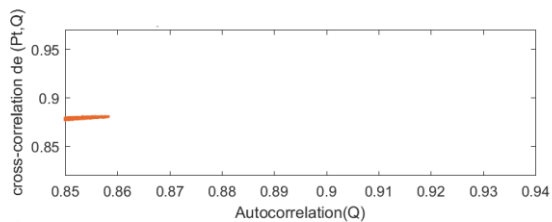
L'assumption



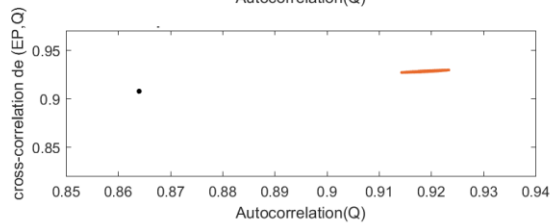
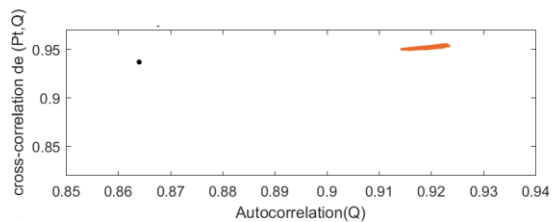
La chevrotiere



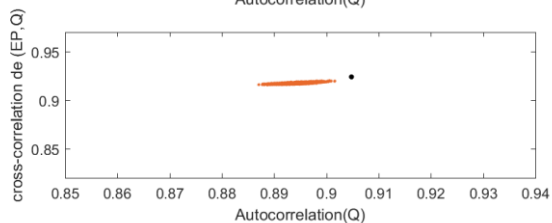
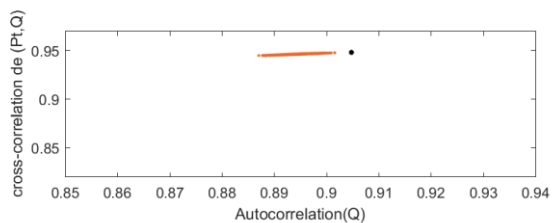
Malbaie



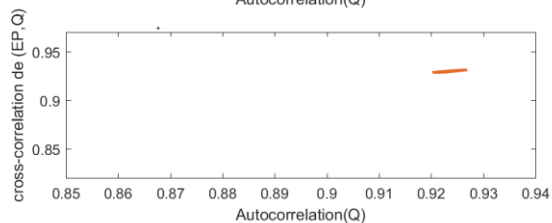
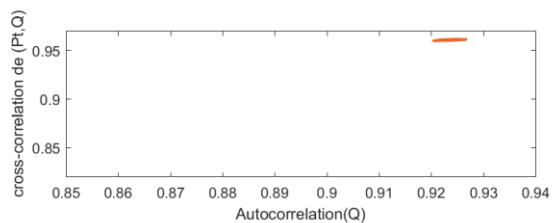
Mars



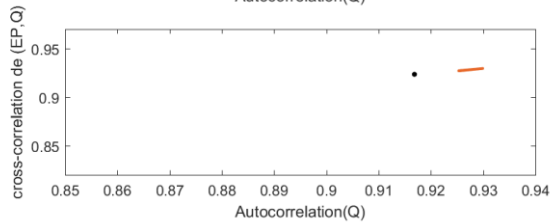
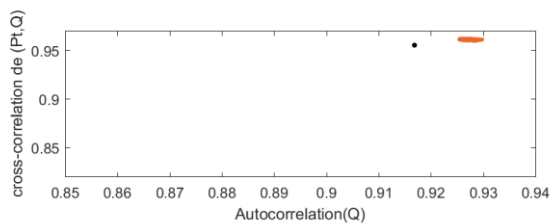
Maskinonge



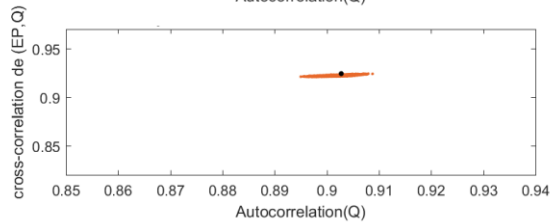
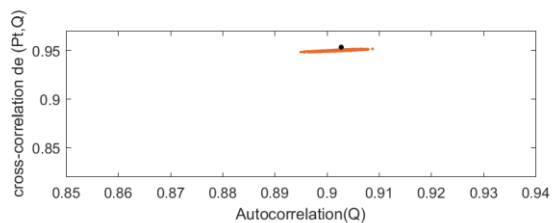
Mastigouche



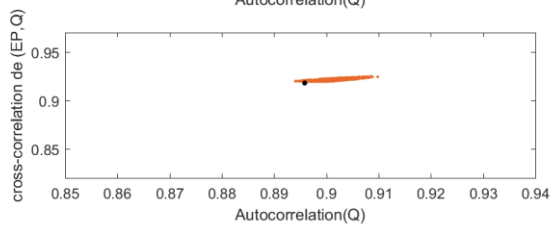
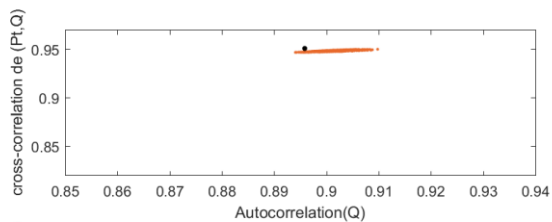
Matane



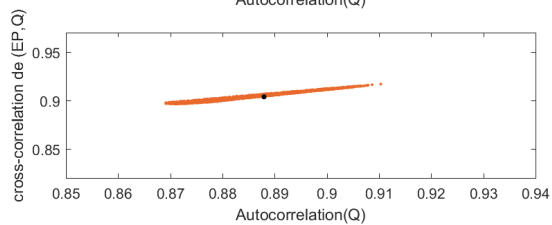
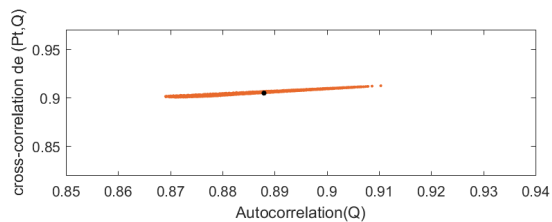
Matapedia



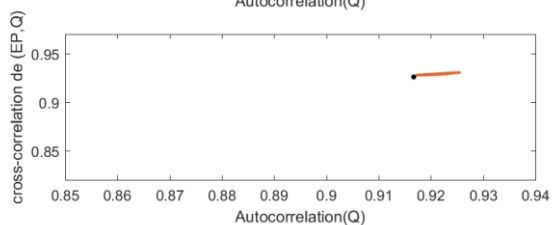
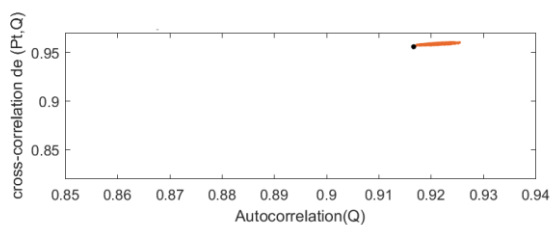
Matawin



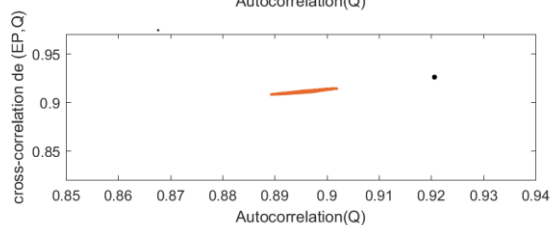
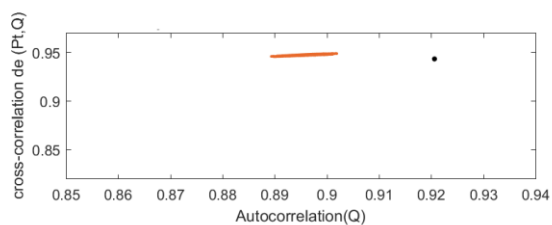
Metabetchouane



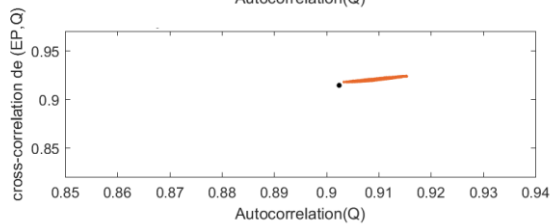
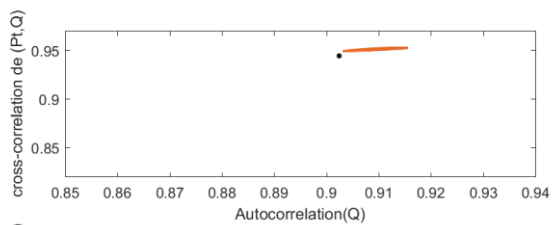
Mistassibi



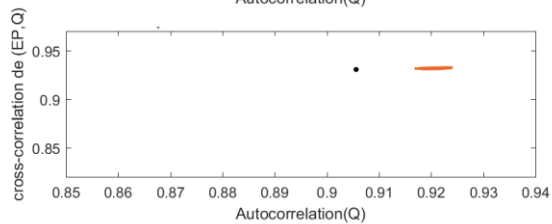
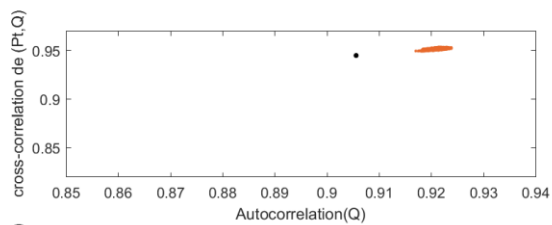
Mistassini



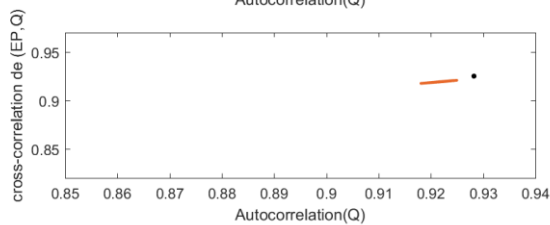
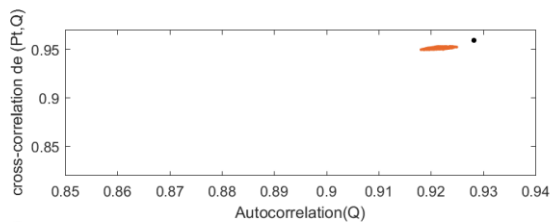
Montmorency 1



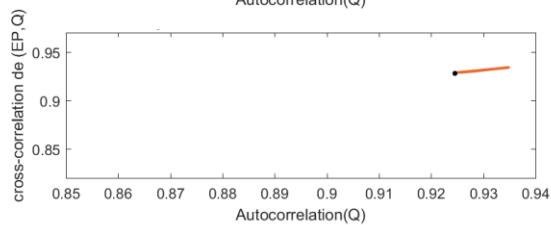
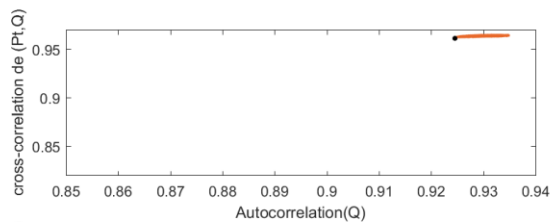
Montmorency 2



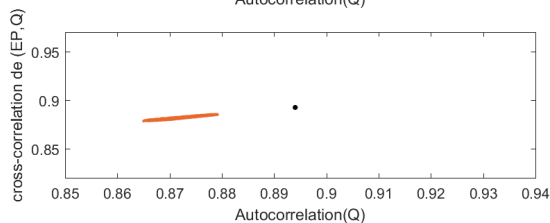
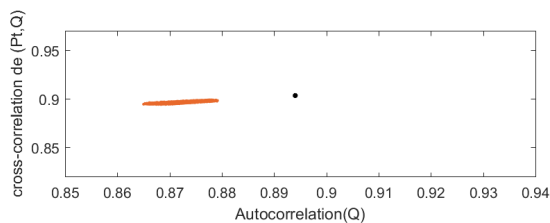
Morpions



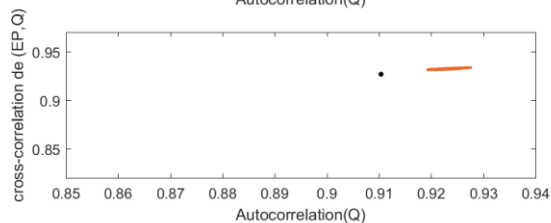
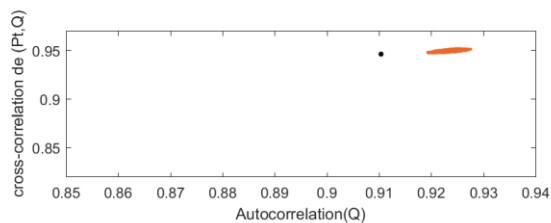
Nastapoca



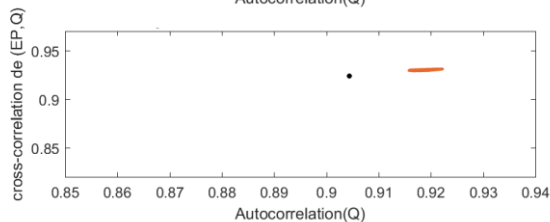
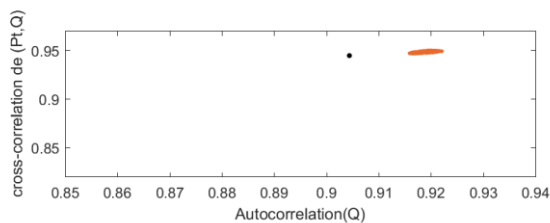
Natashquan



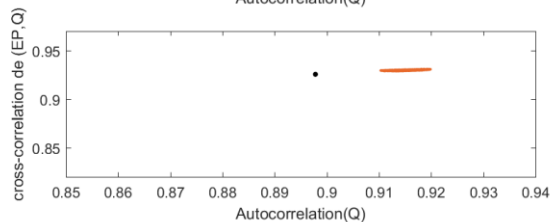
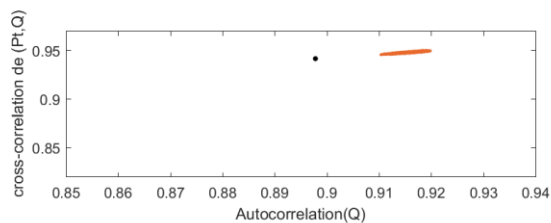
Nelson



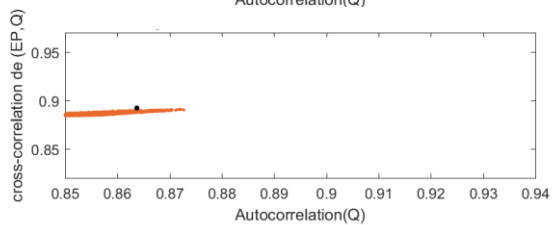
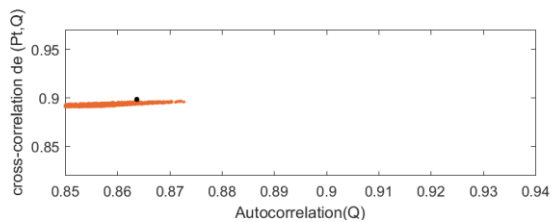
Nicolet



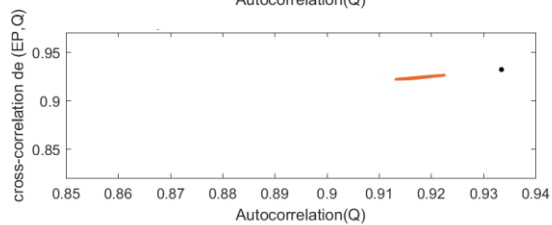
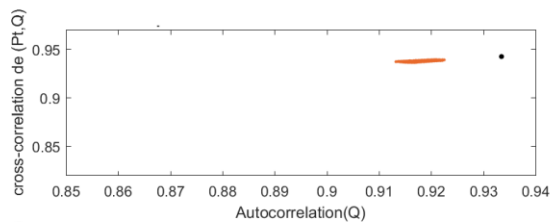
Nicolet sud ouest



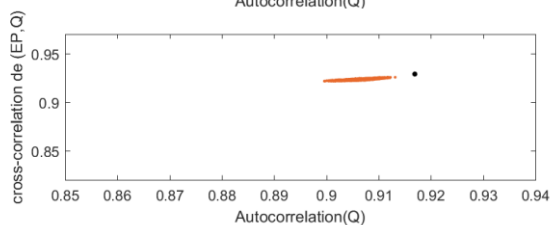
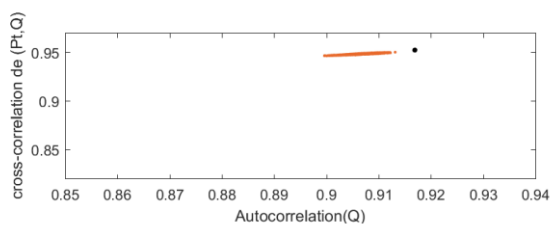
Noire 1



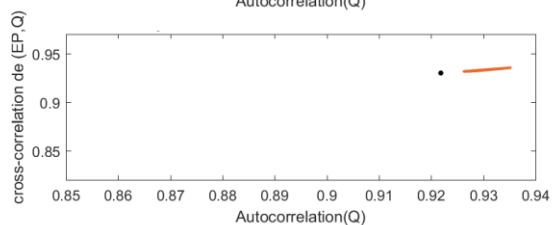
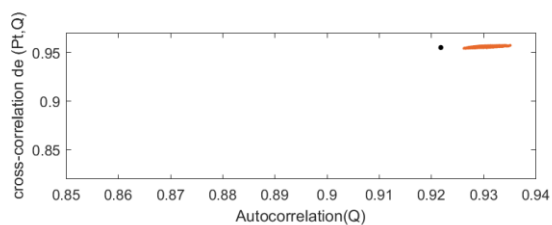
Noire 2



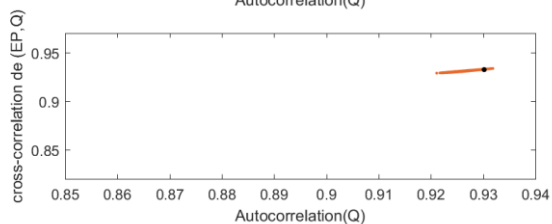
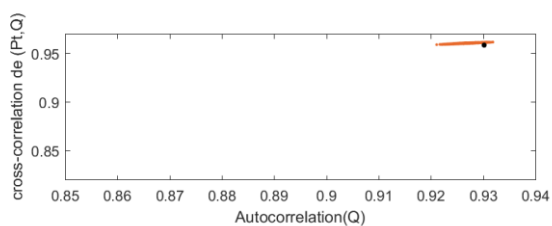
Nouvelle



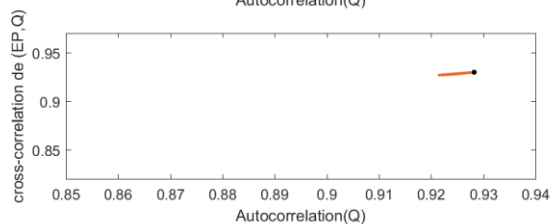
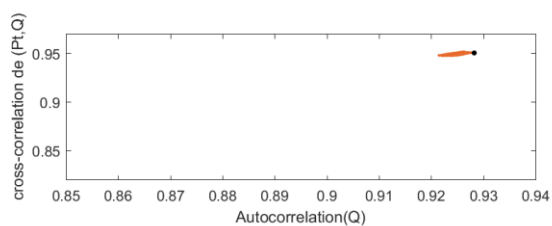
Ouareau



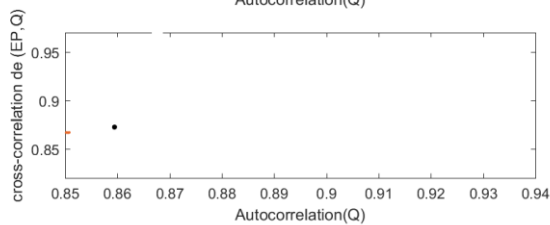
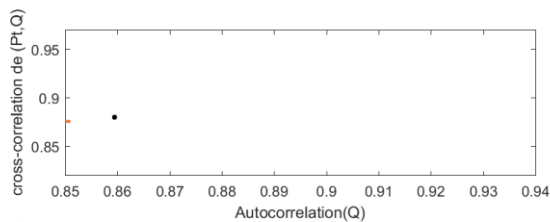
Ouelle



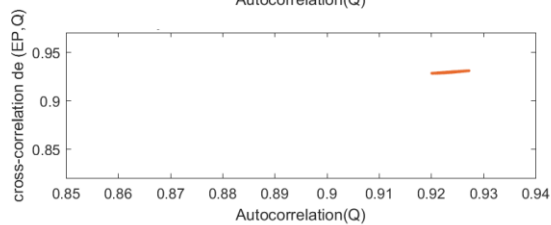
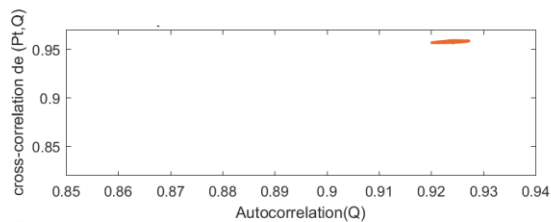
Petit Saguenay



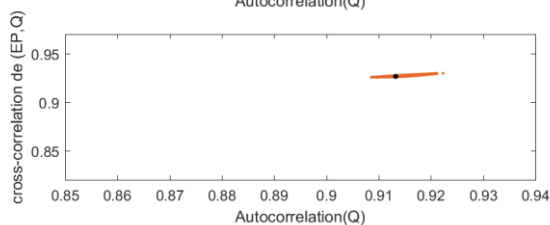
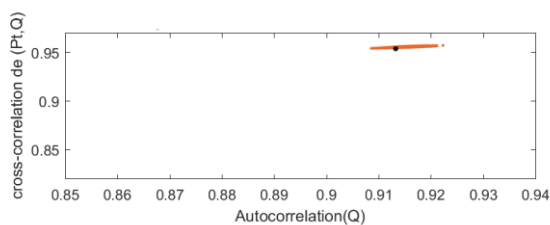
Petite Riviere Cascapedia



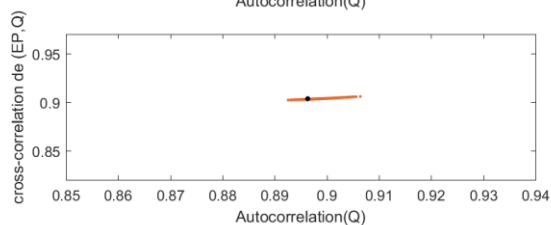
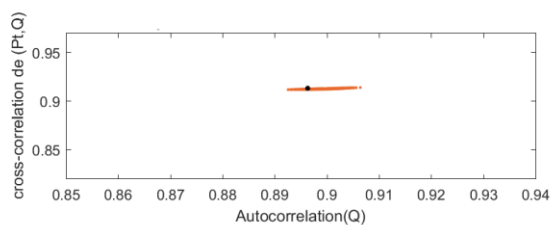
Petite Riviere Du Chene



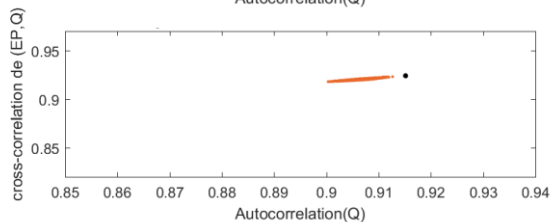
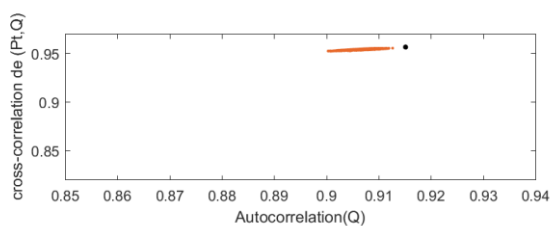
Petite Riviere Neigette



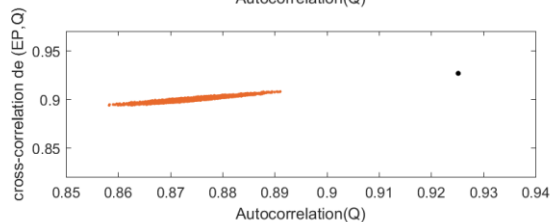
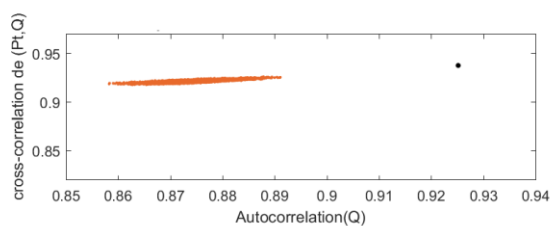
Petite Riviere Peribonka



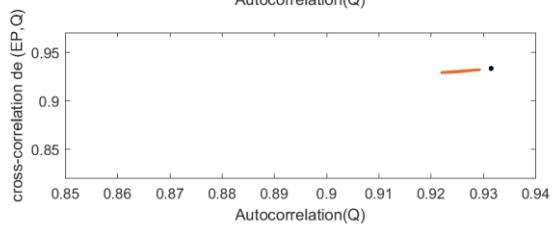
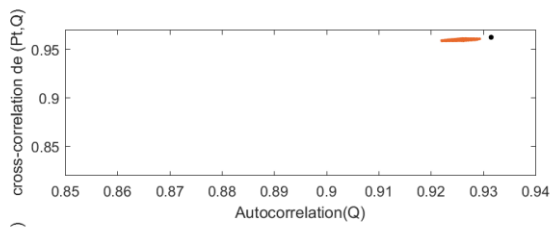
Picanoc



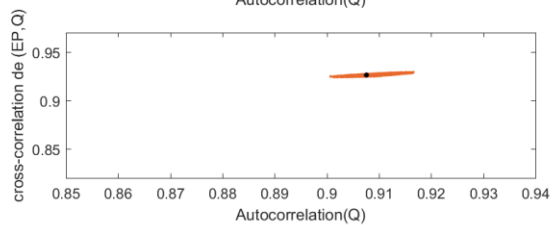
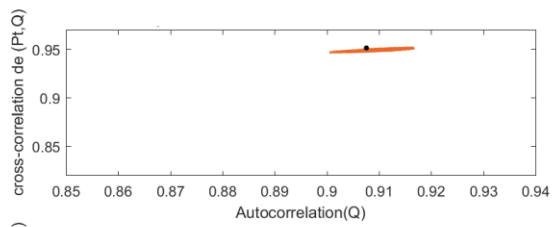
Pikauba 1



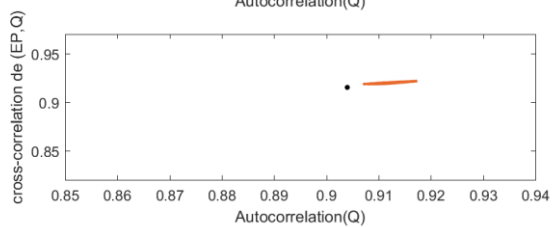
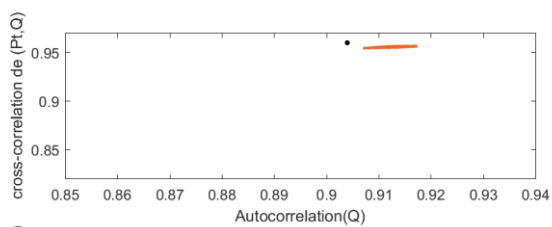
Portneuf



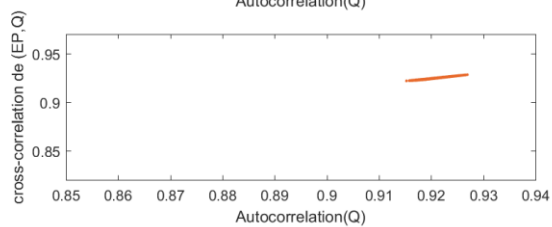
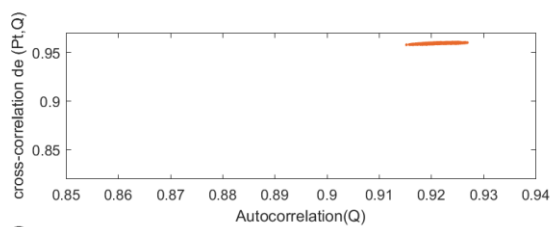
Rimouski



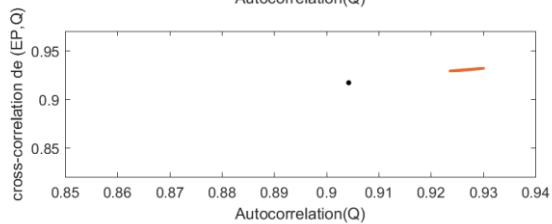
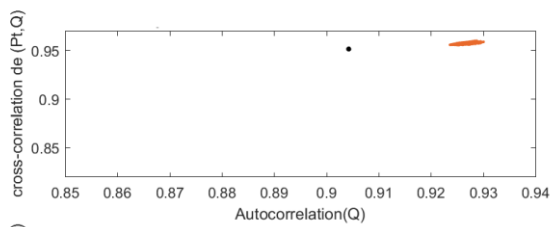
Rouge 1



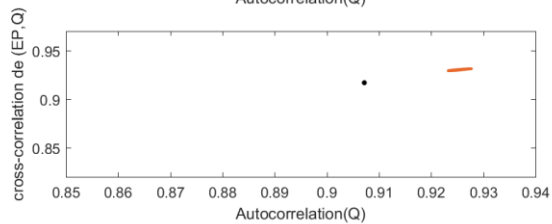
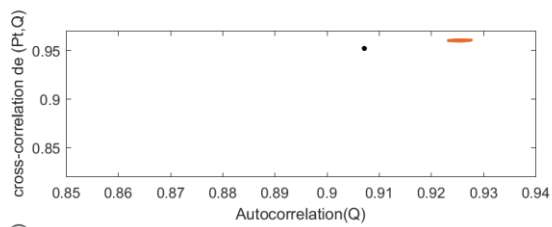
Pontax



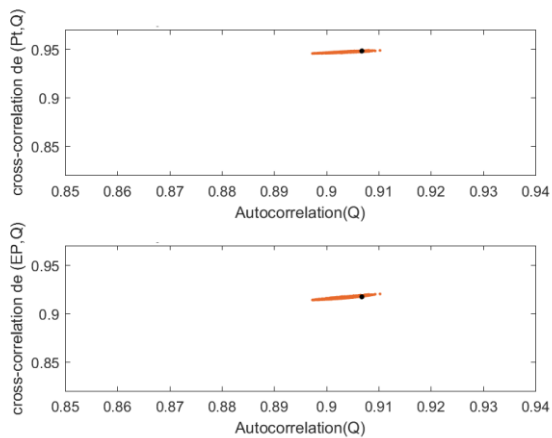
Saint Paul



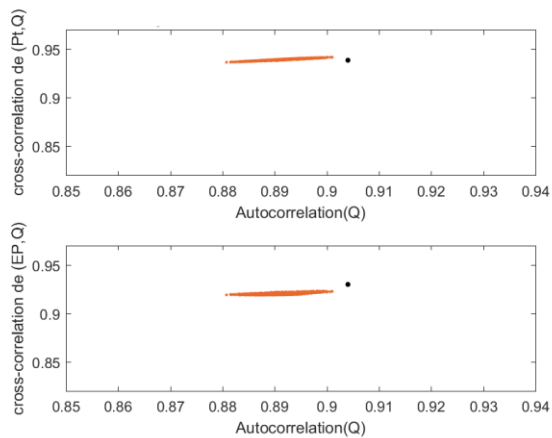
Saint louis



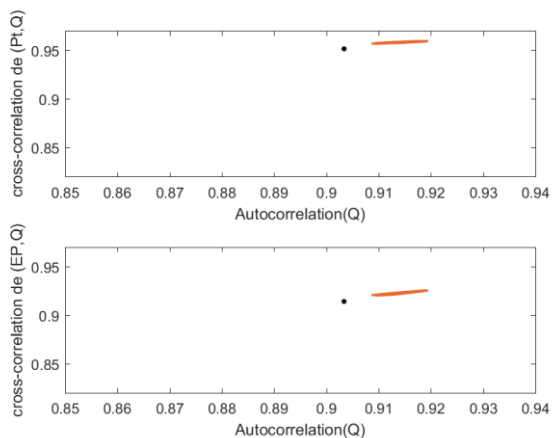
Sainte Anne 1



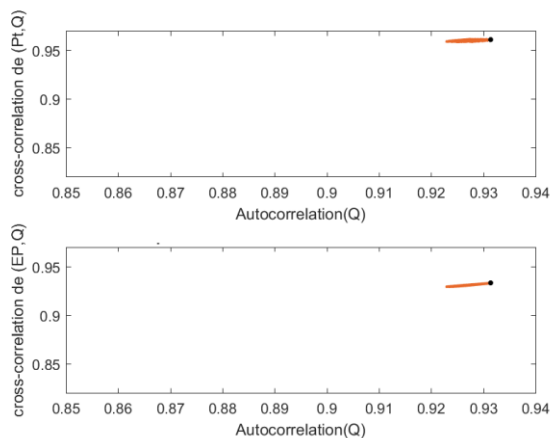
Sainte Anne 2



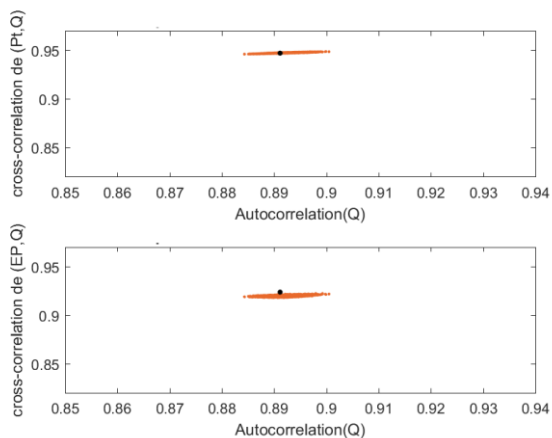
Suffolk



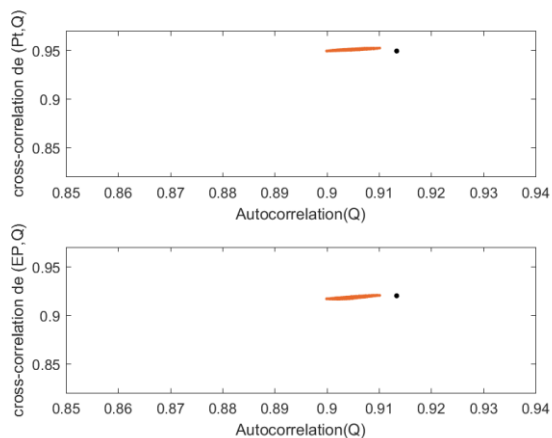
Sainte Marguerite Nord-Est



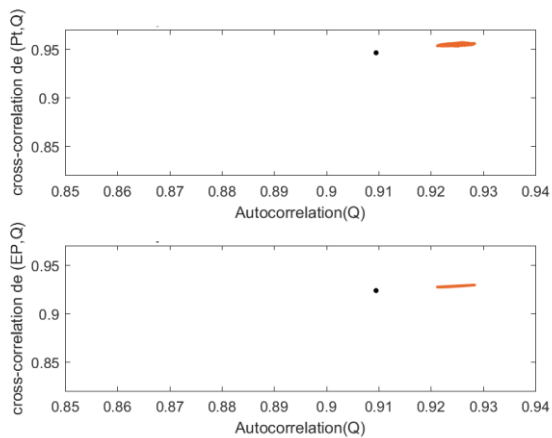
Trois pistoles



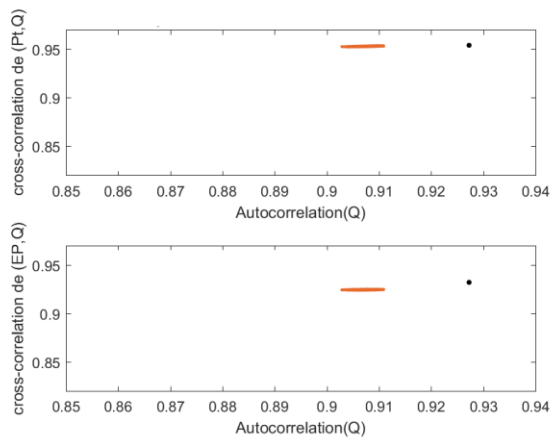
Vermillon



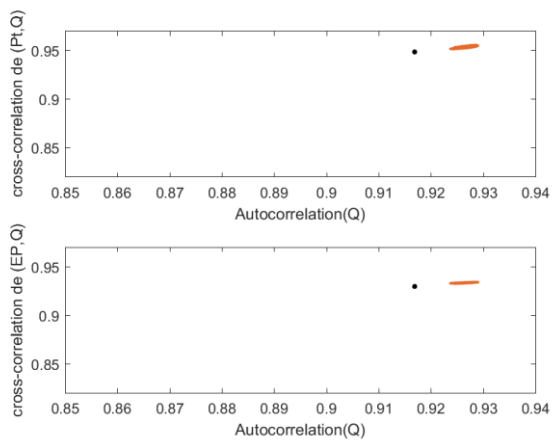
Valin



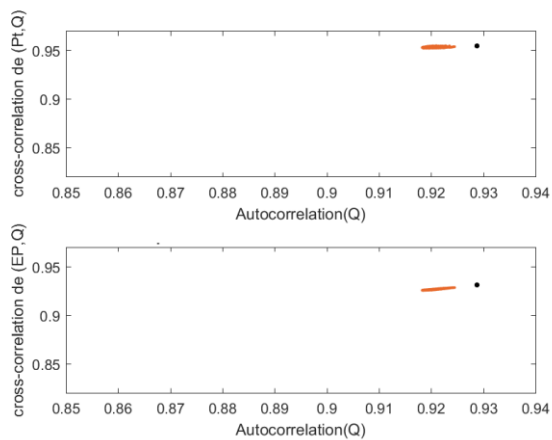
Yamaska



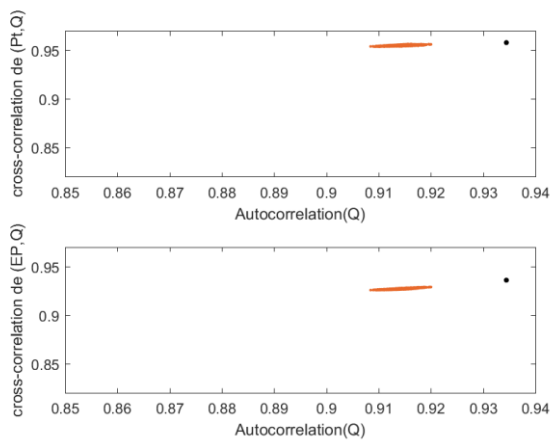
Yamaska Nord 1



Yamaska Nord 2



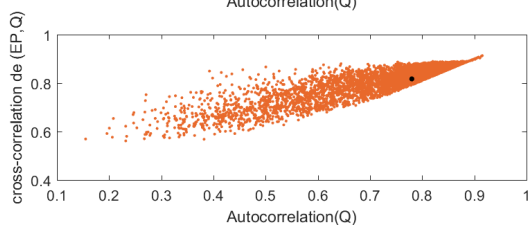
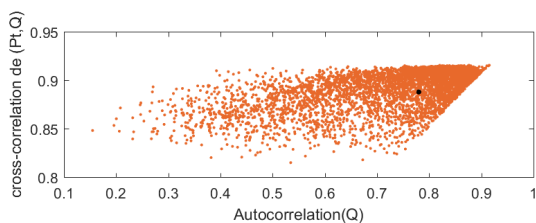
York



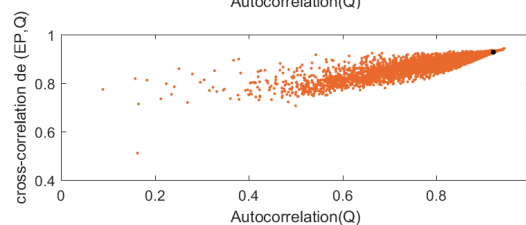
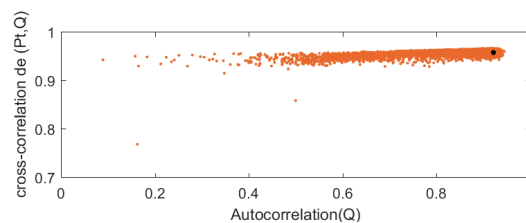
Waswanipi

Annexe J : LES RESULTATS DE L'APPLICATION DE LA METHODE DE COVARIANCE SUR LE MODÈLE HMETS

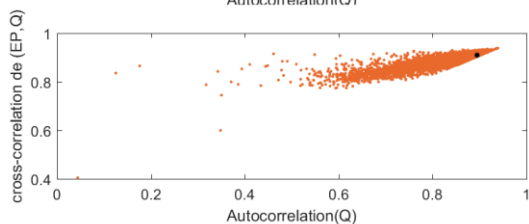
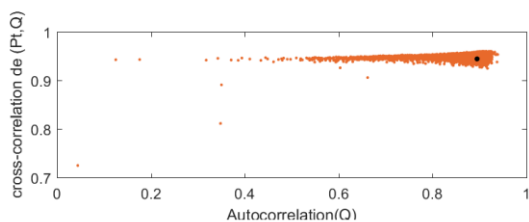
Cette section présente les figures ayant permis la validation par la méthode de la covariance du modèle HMETS pour les 126 Bassins versants utilisés dans cette étude :



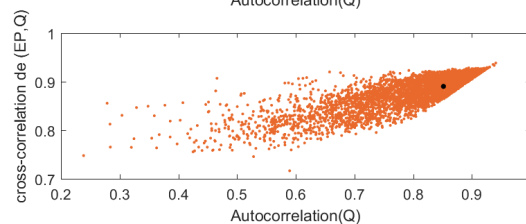
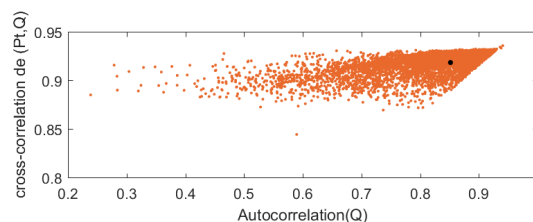
A l'ours



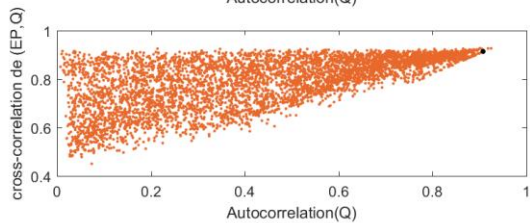
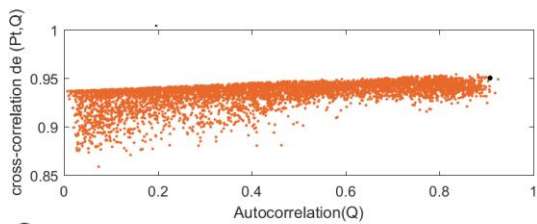
Ashuapmushuan



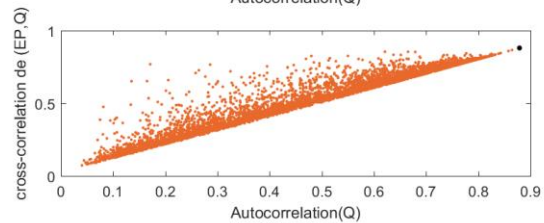
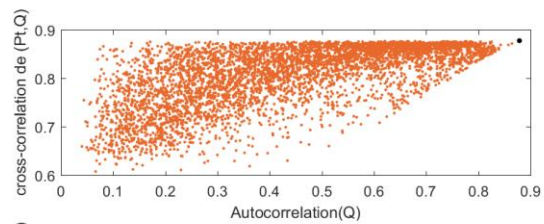
Au saumon



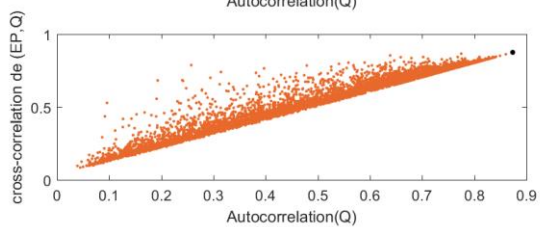
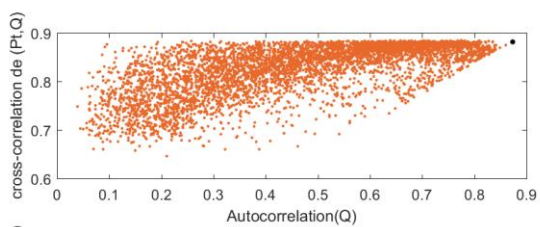
Aux_Brochets



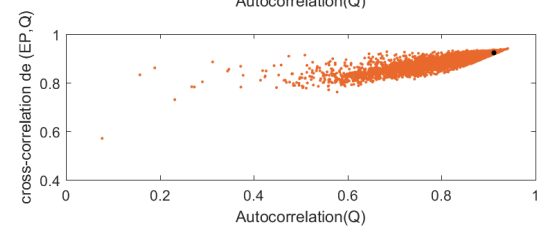
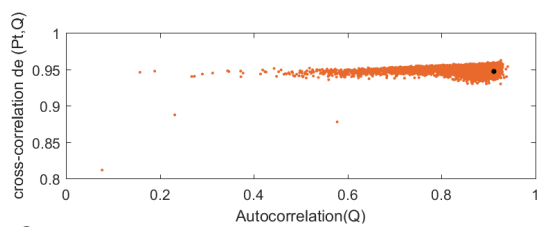
A la Baleine



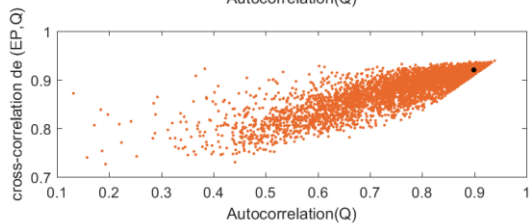
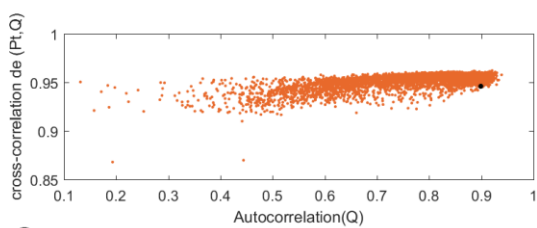
Aux Feuilles



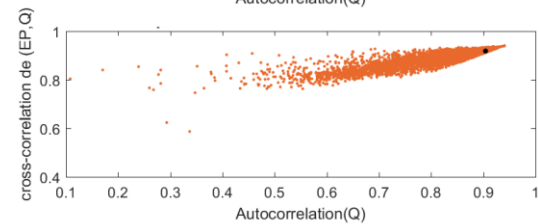
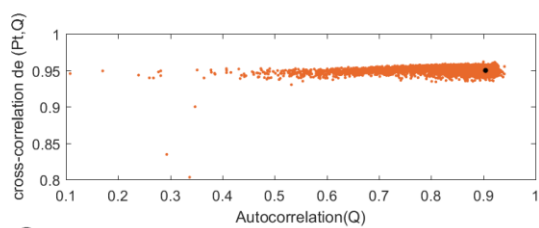
Aux_Melezes



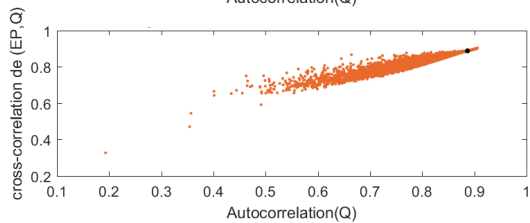
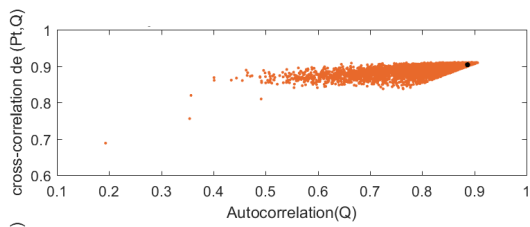
Aux_Pommes



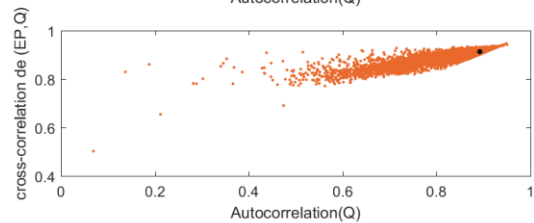
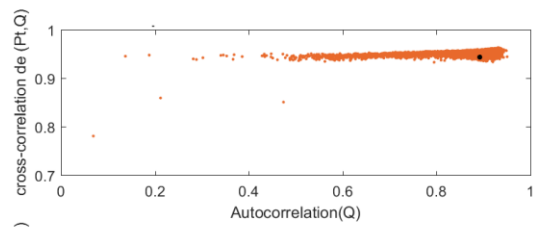
Aux_Saumons



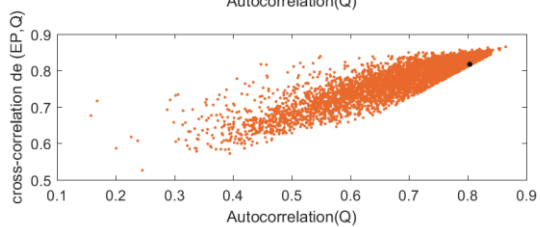
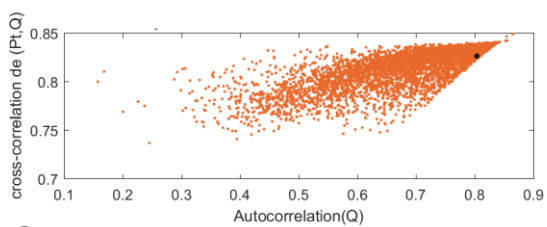
Batiscan



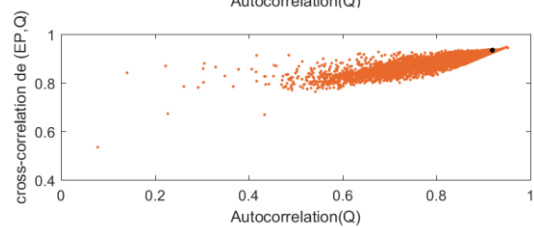
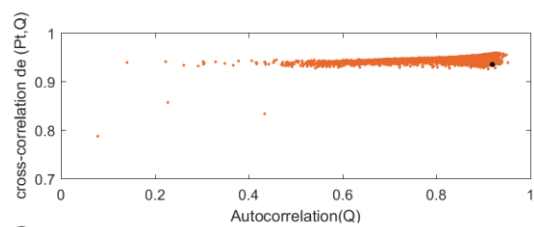
Beauport



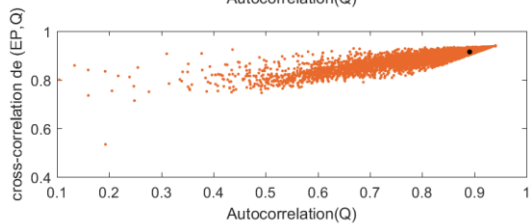
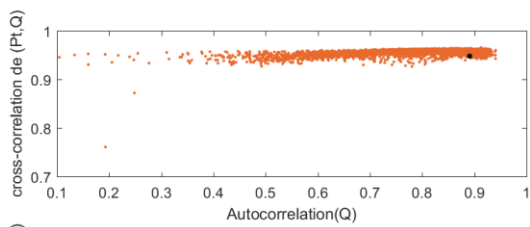
Beaurivage



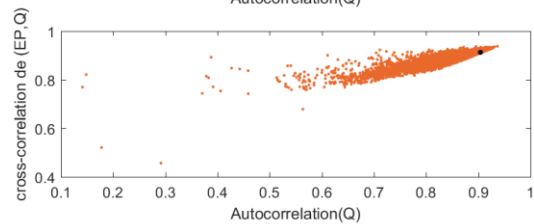
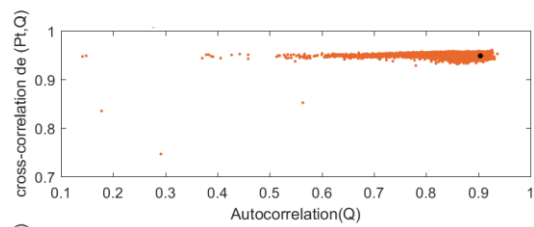
Des Hurons 2



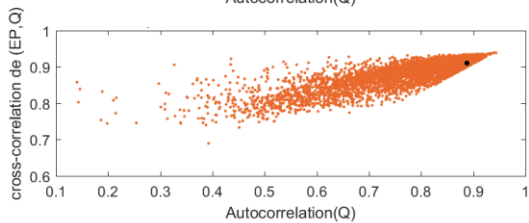
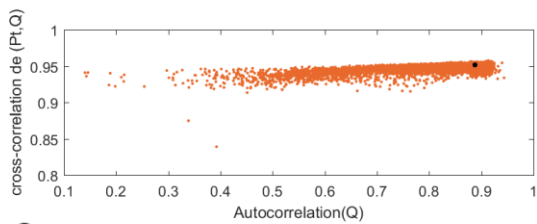
Becancour2



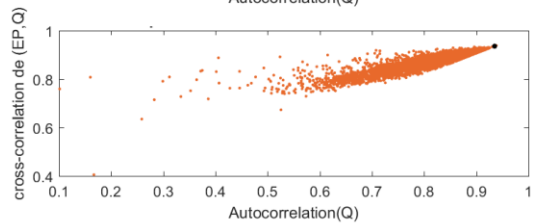
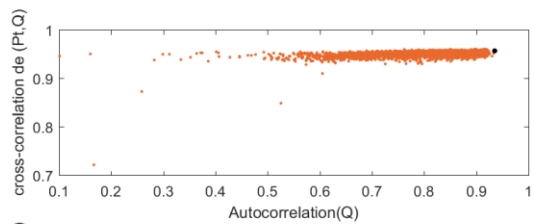
Bell



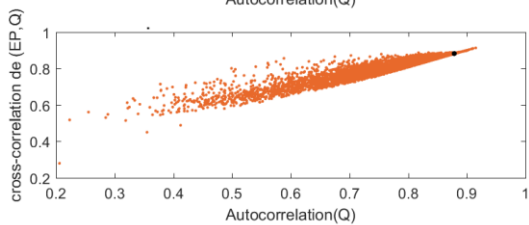
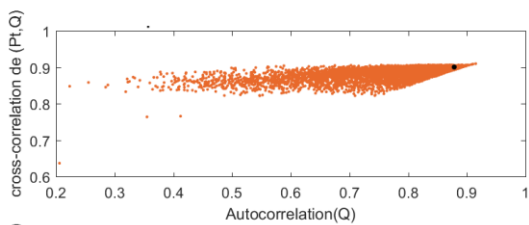
Bras du nord



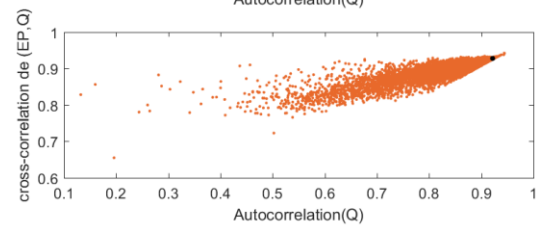
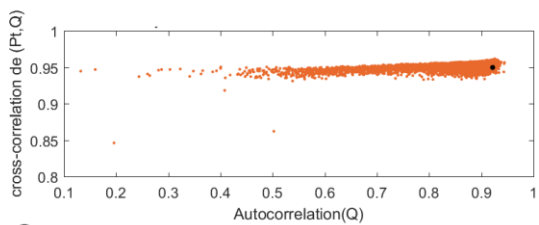
Belle_Riviere



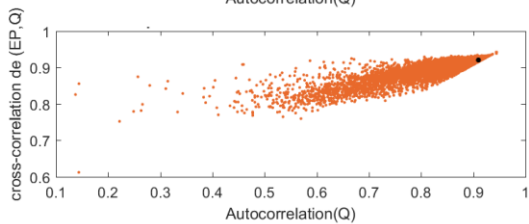
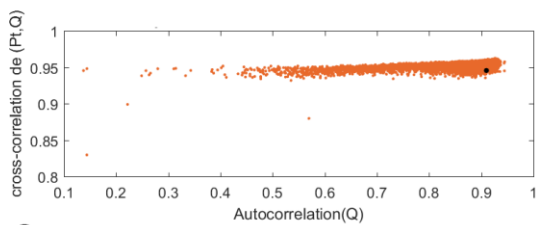
Bonaventure



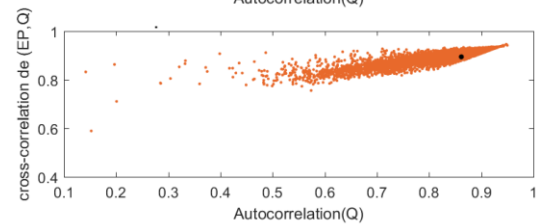
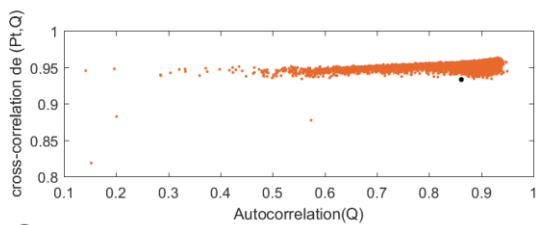
Bourbon



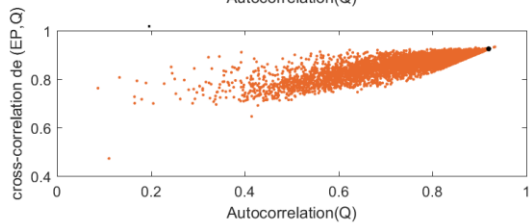
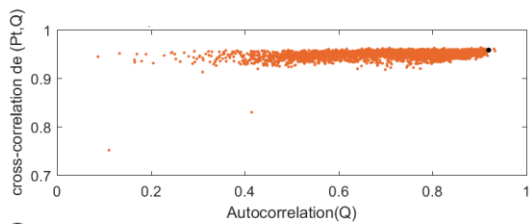
Boyer



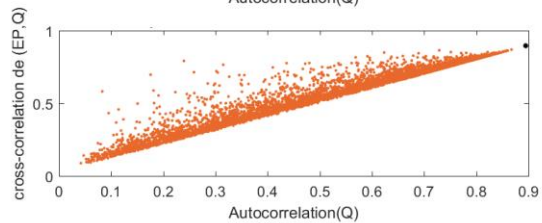
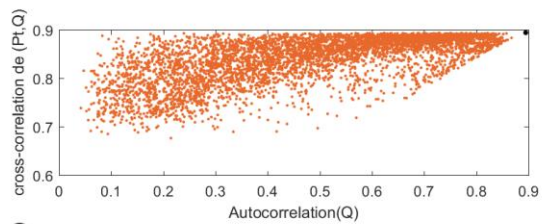
Boyer_Sud



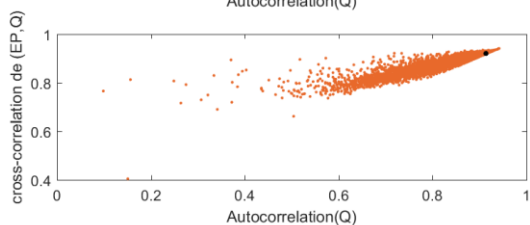
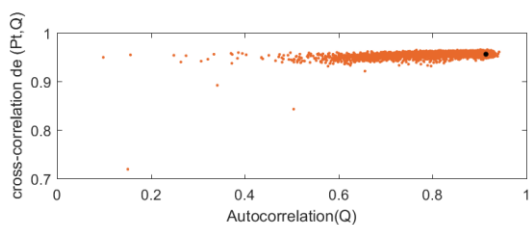
Bras_D_Henri



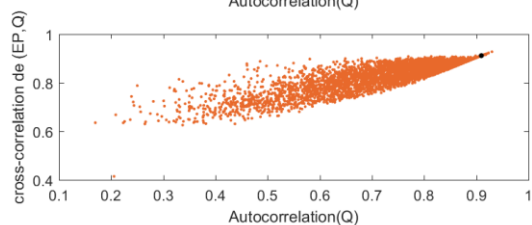
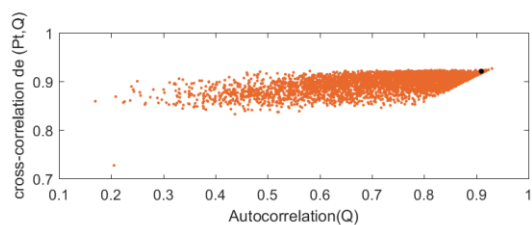
Broadback



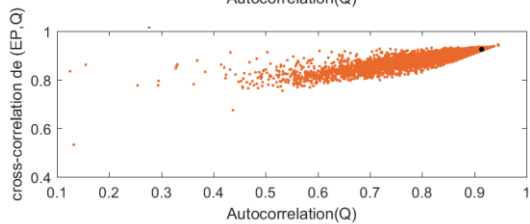
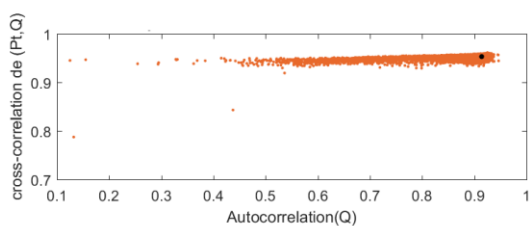
Caniapiscou



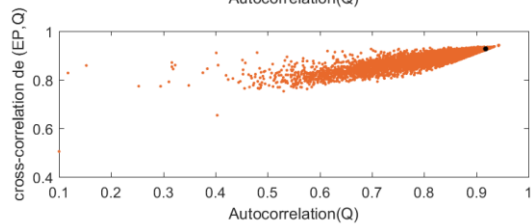
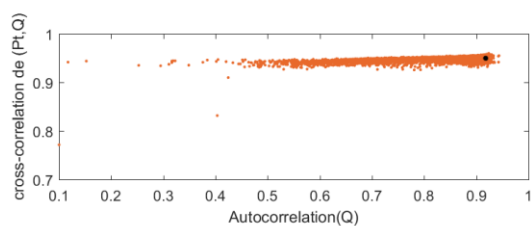
Cascadia



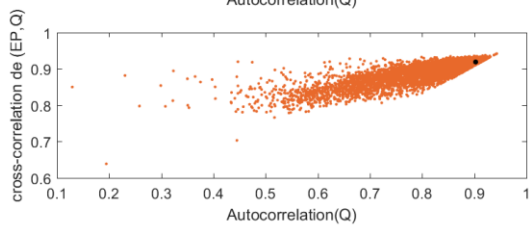
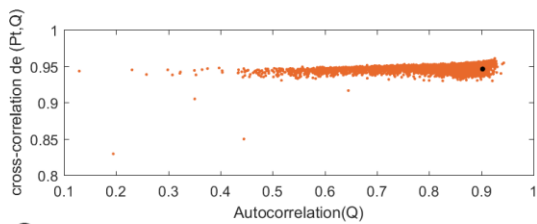
Chateaugay



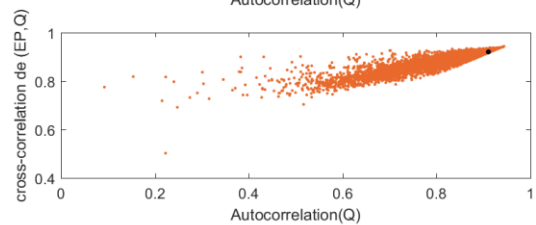
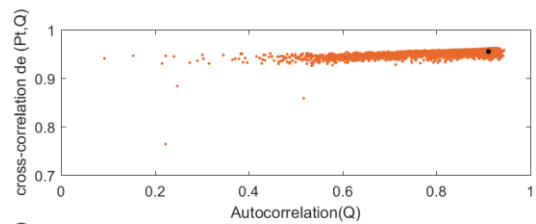
Chaudiere1



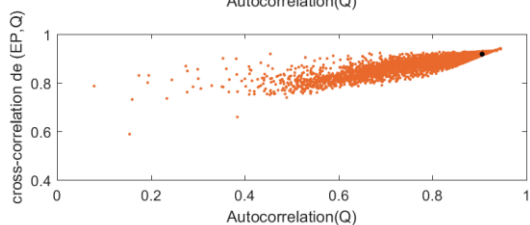
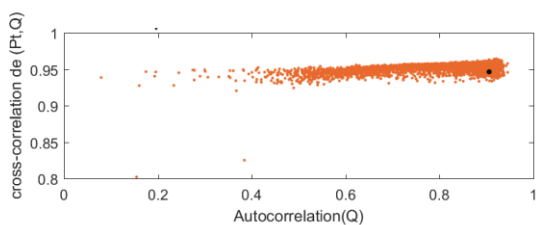
Chaudiere2



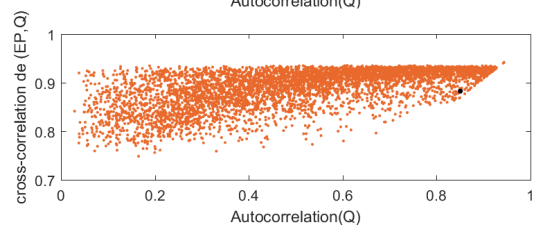
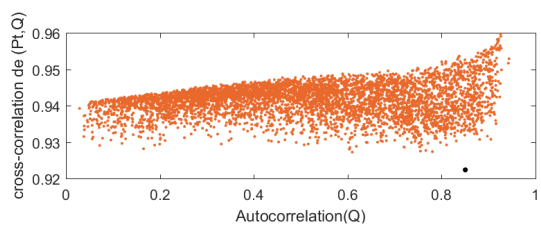
Coaticook



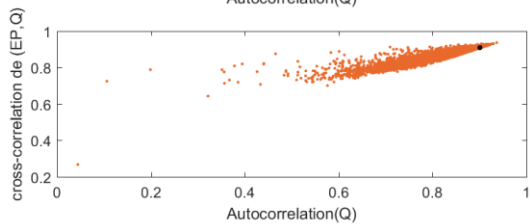
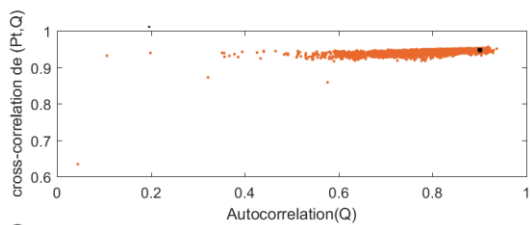
Cyriac



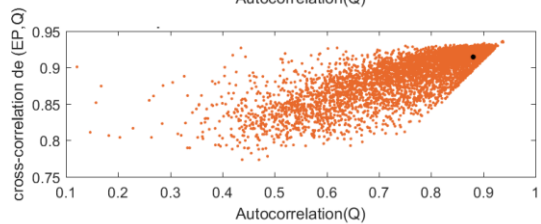
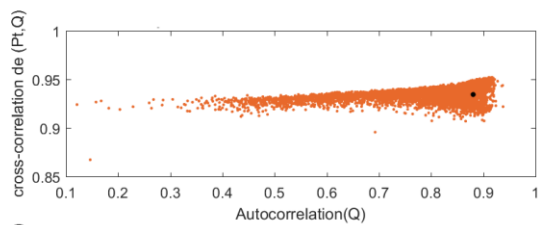
Croche



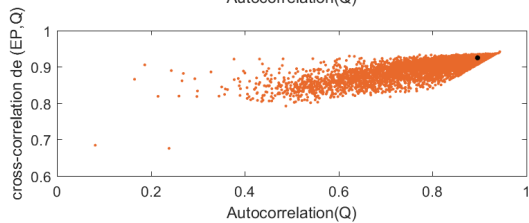
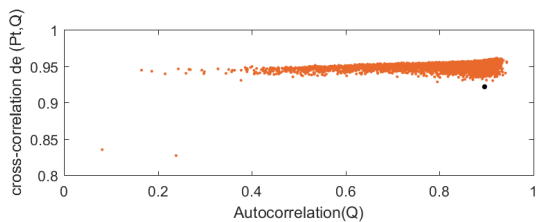
Dauphine



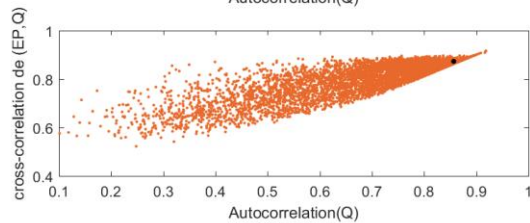
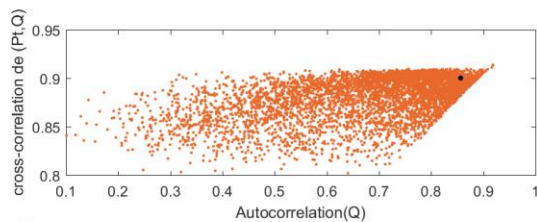
Dartmouth



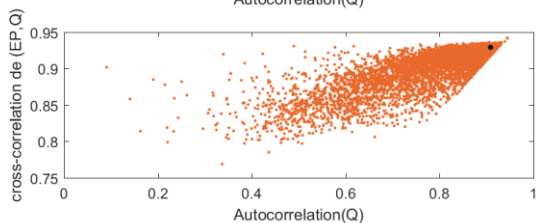
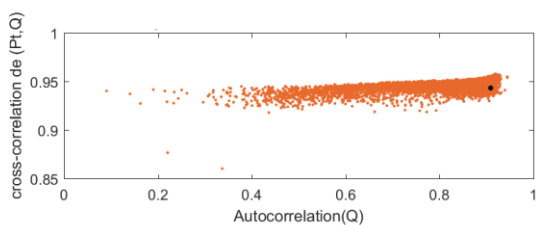
David



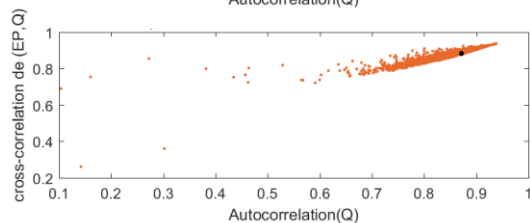
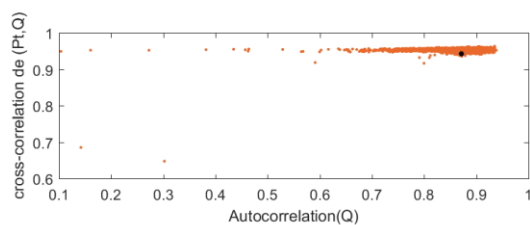
De la roche



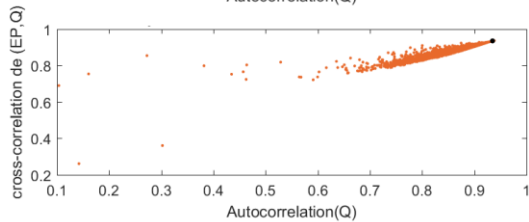
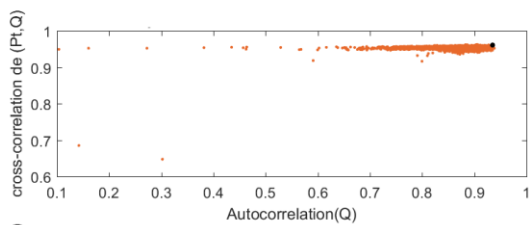
Des anglais 1



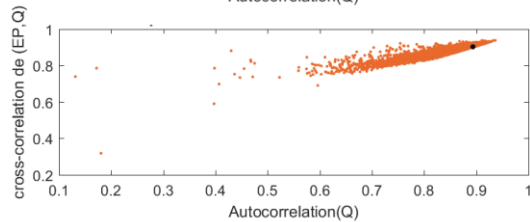
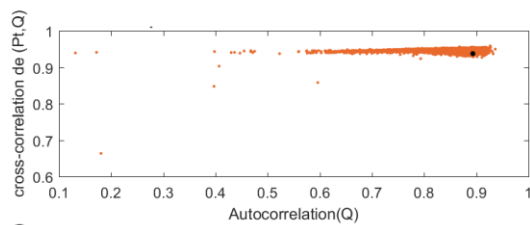
Des Anglais 2



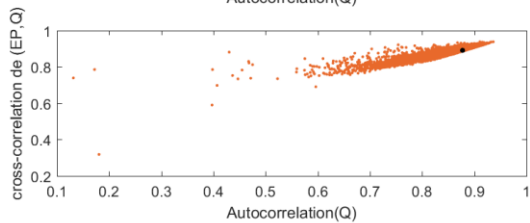
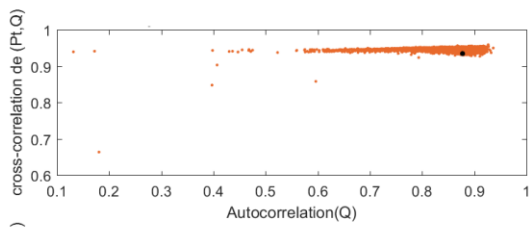
Des Aulnaies1



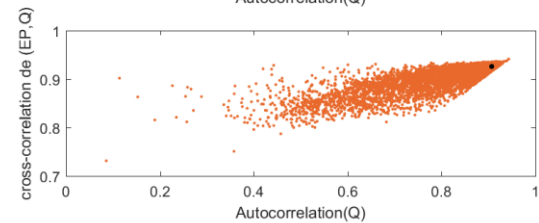
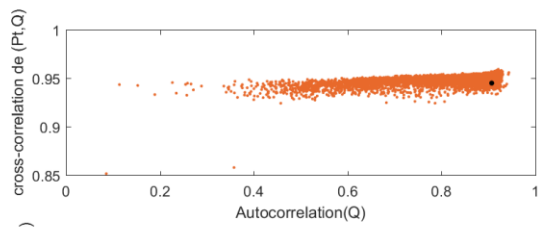
Des Aulnaies 2



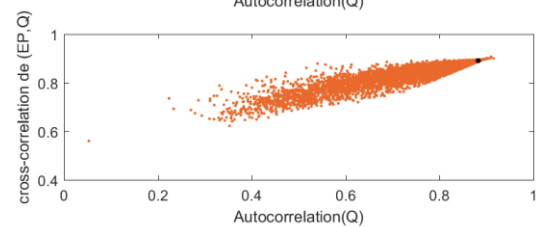
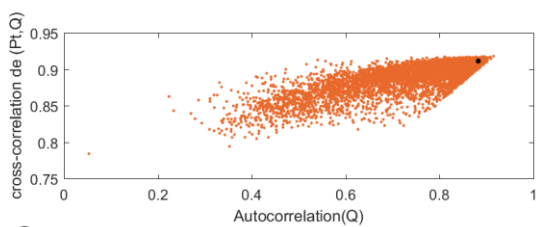
Des Eaux Volées 1



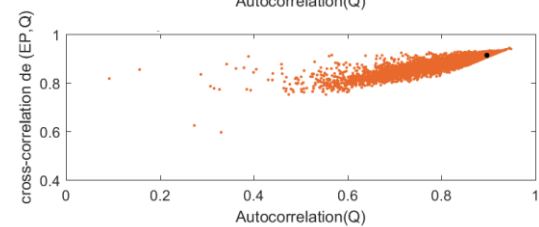
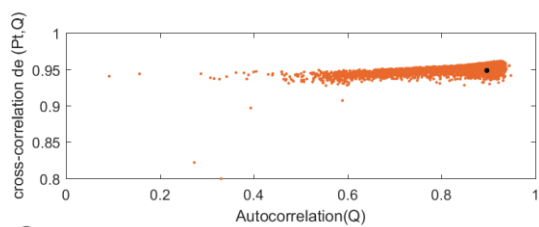
Des Eaux Volées 2



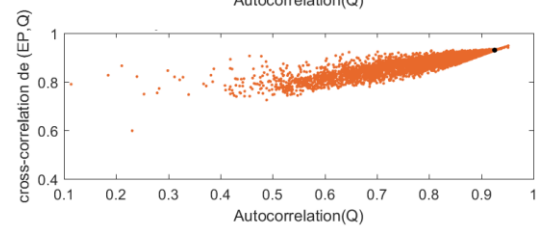
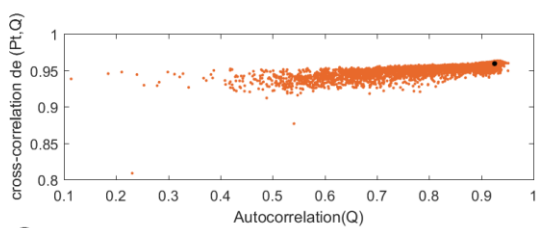
Des hurons 1



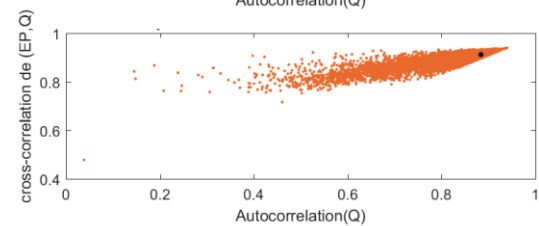
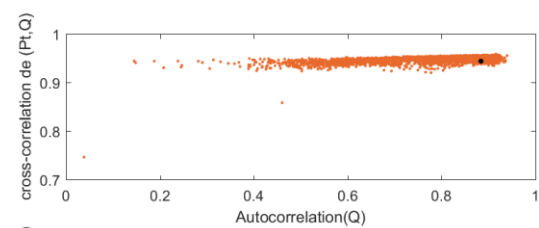
Désert



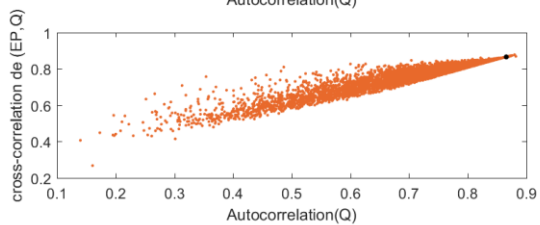
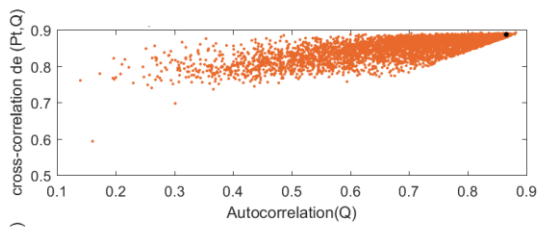
Doncaster



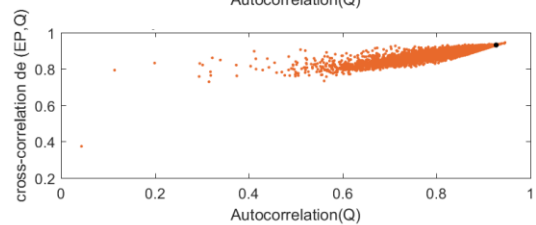
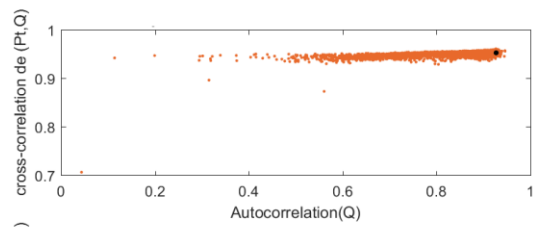
Du loup 1



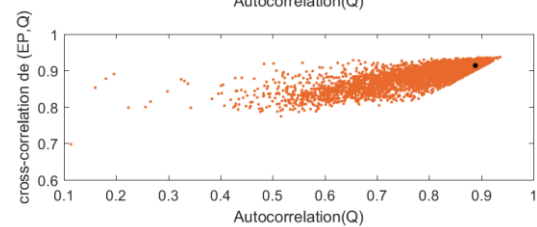
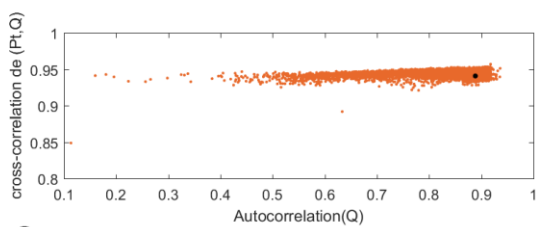
Du loup 2



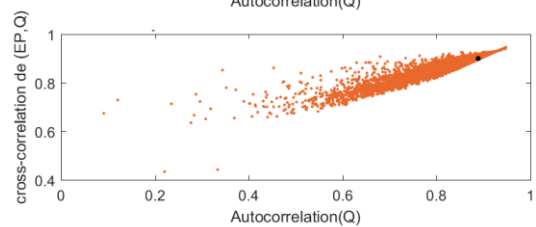
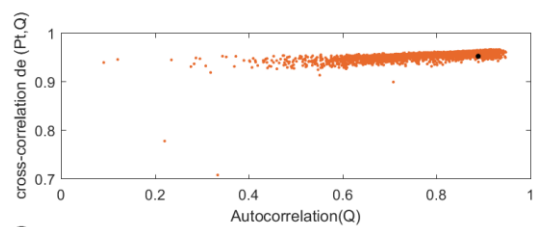
Du moulin



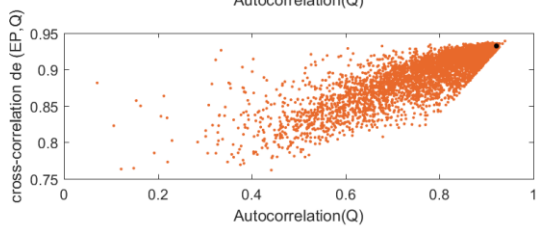
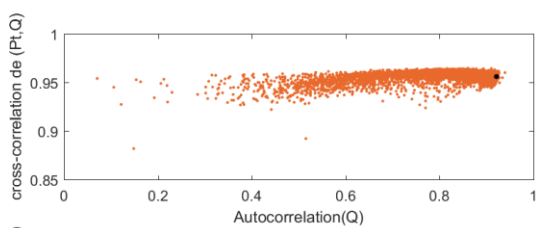
Du sud



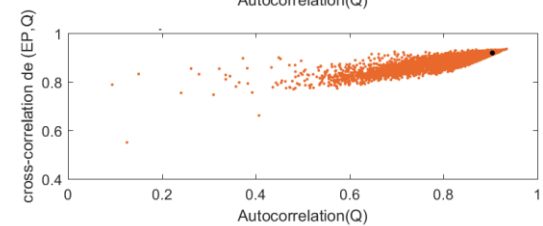
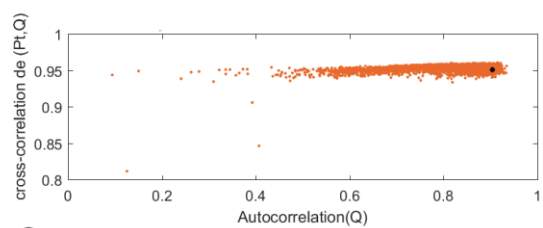
De L'achigan



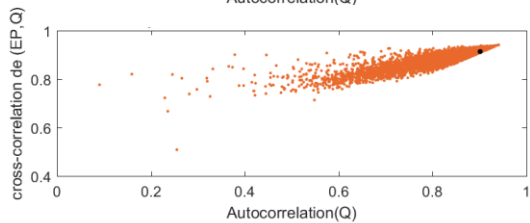
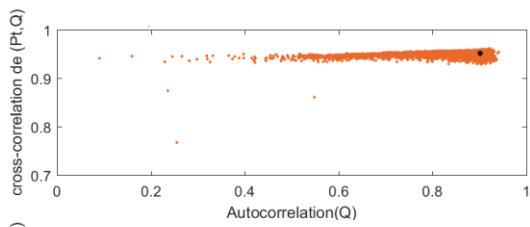
Du Petit Mecatina



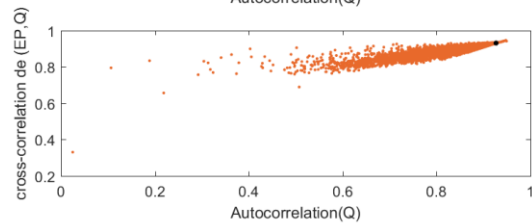
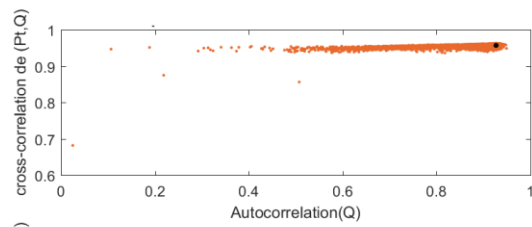
Dumoine



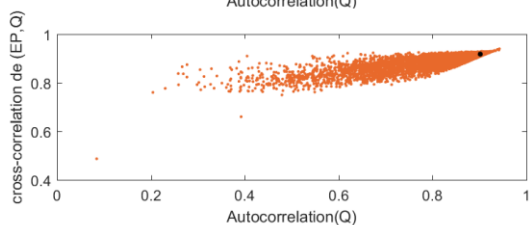
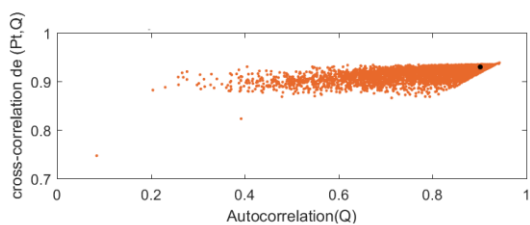
Eaton



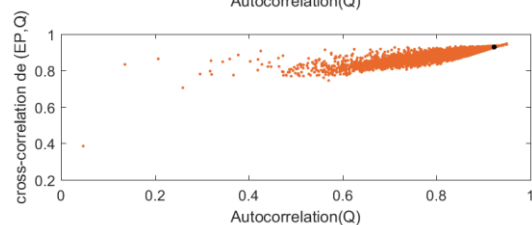
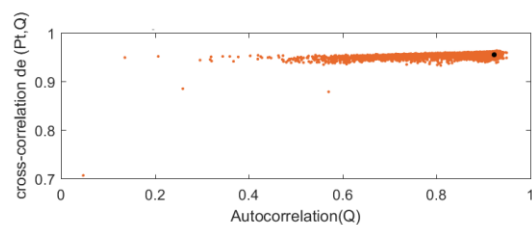
Ecorces



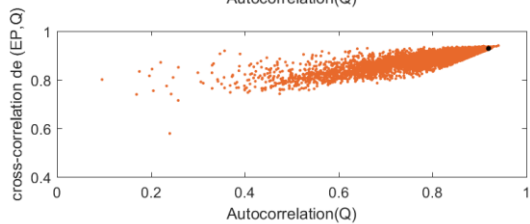
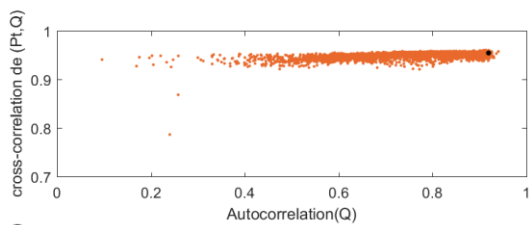
Etchemin



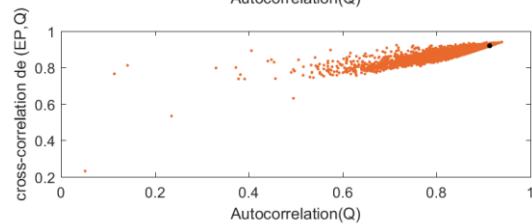
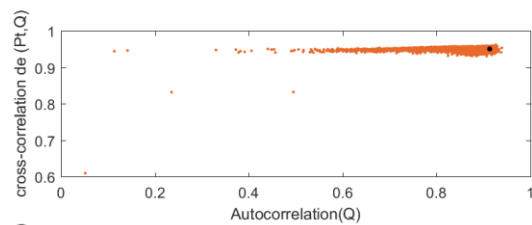
Ewing



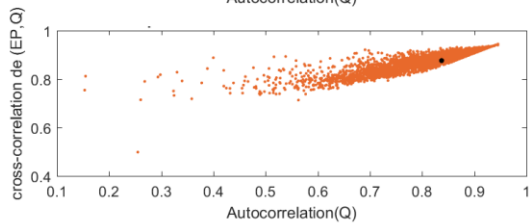
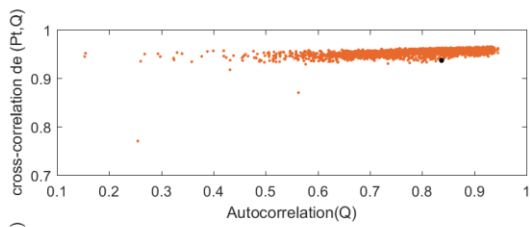
Famine



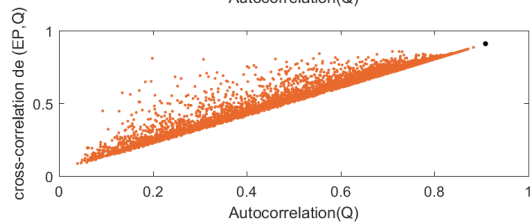
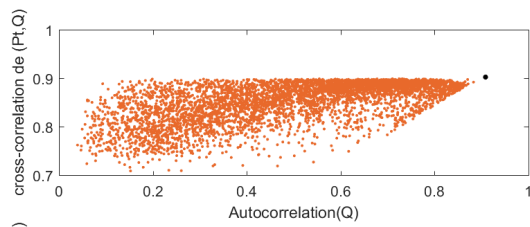
Gatineau



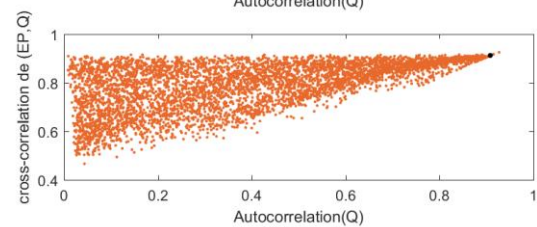
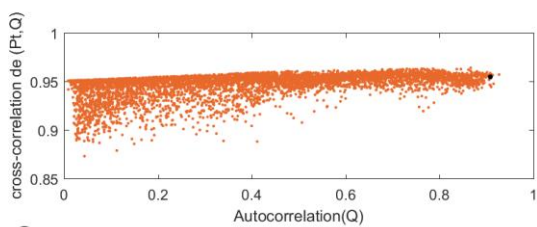
Jacques cartier



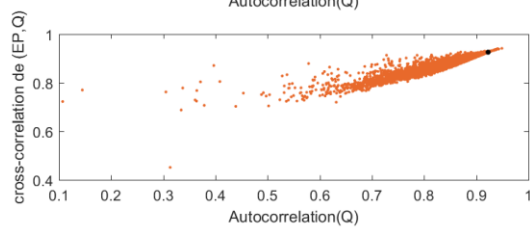
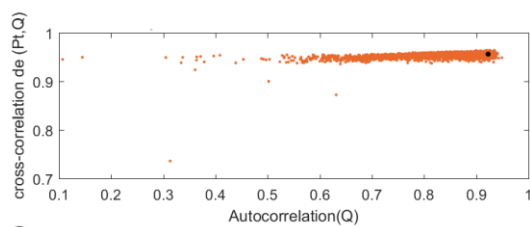
Escoumins



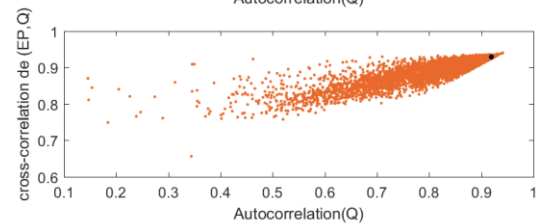
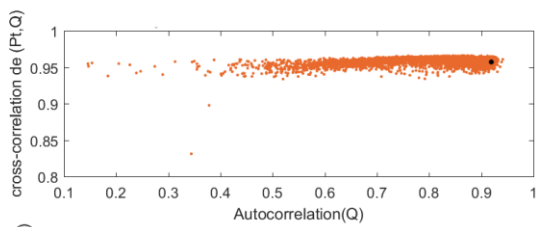
George



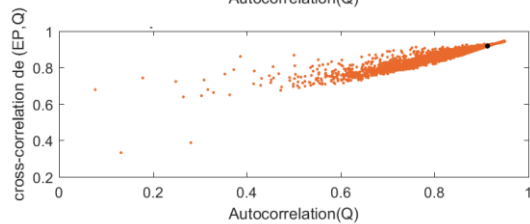
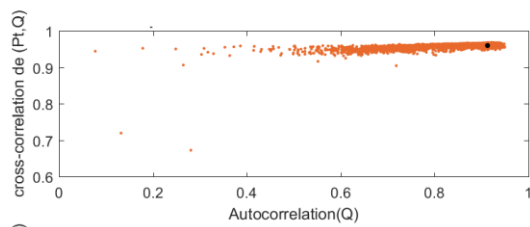
Grand Rivière de la Baleine



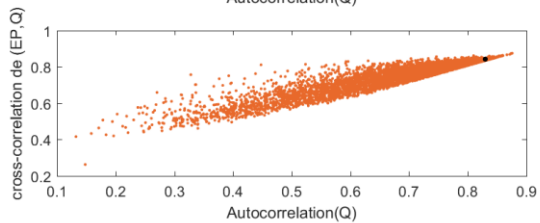
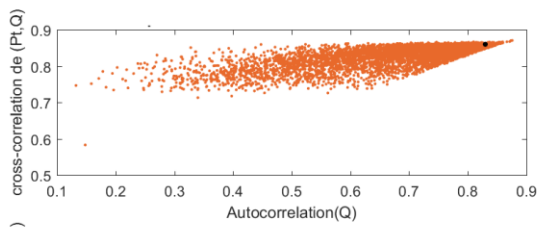
Godbout



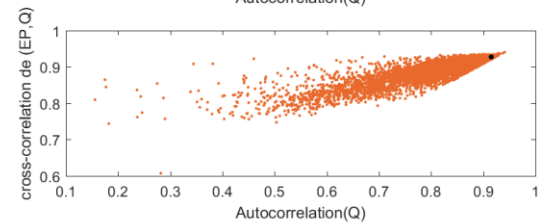
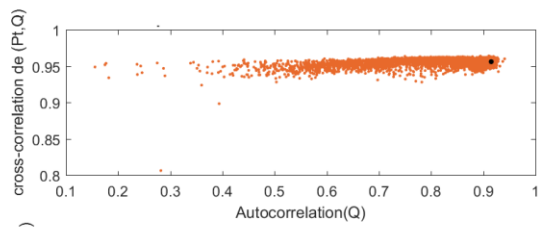
Harricana



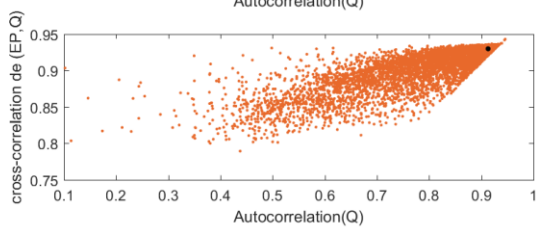
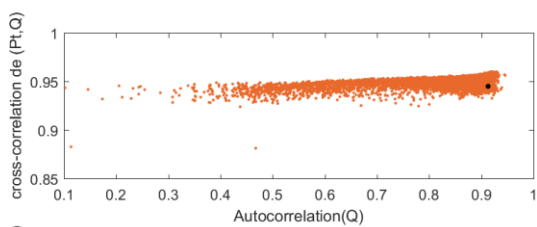
Magpie



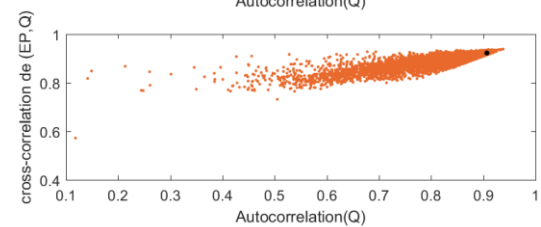
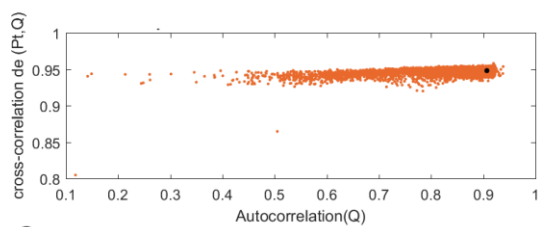
Kamouraska



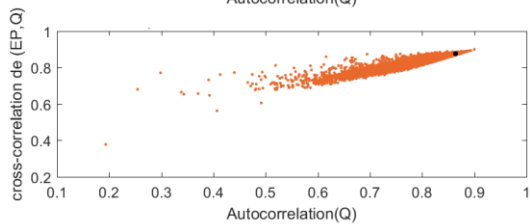
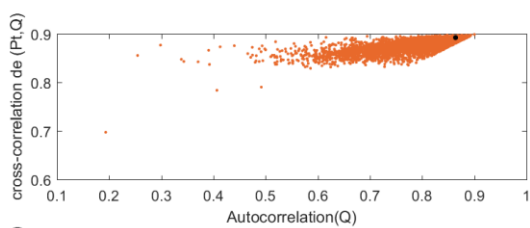
Kinojevis



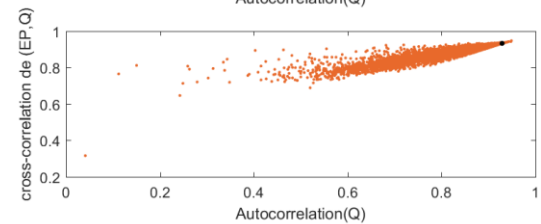
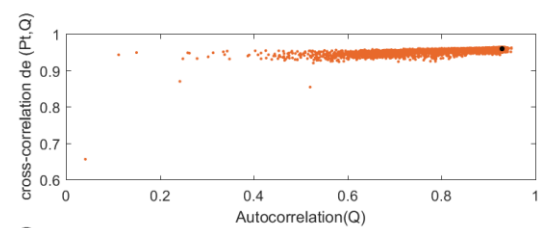
L'acadie



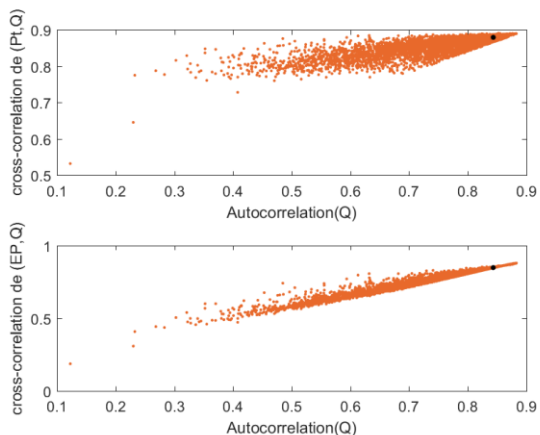
L'assomption



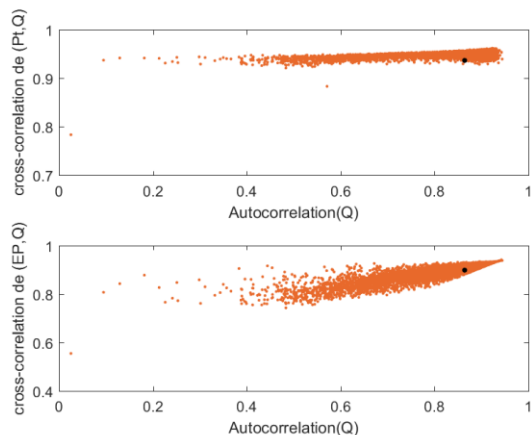
La chevrotiere



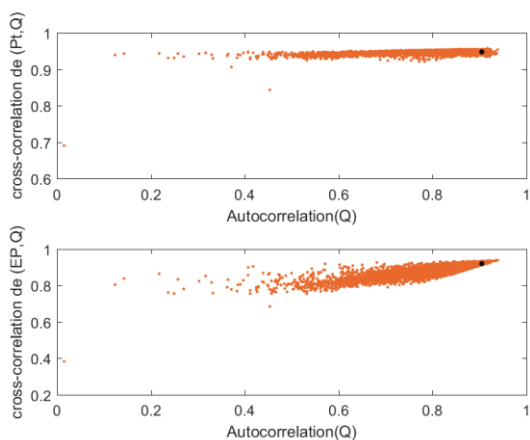
Malbaie



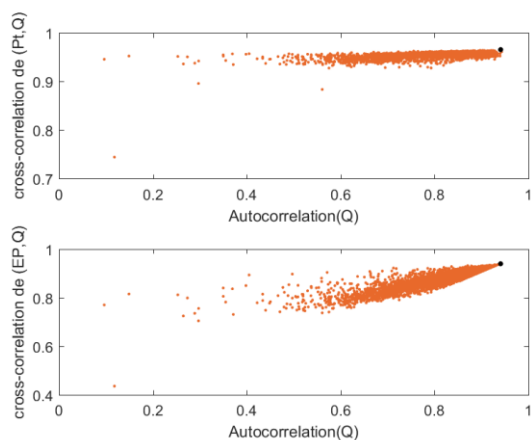
Mars



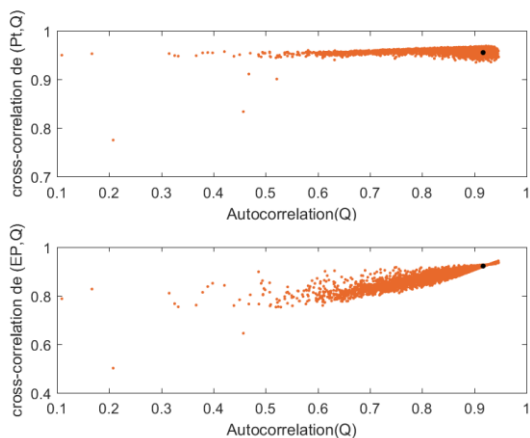
Maskinonge



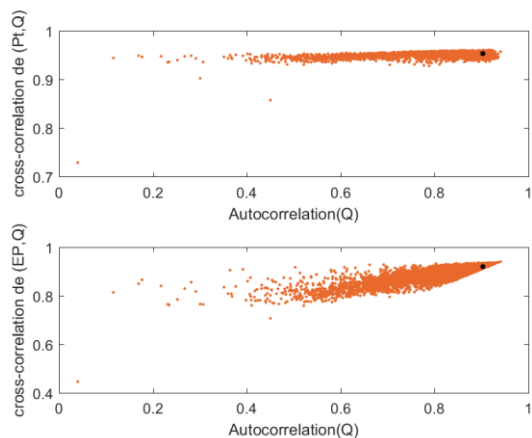
Mastigouche



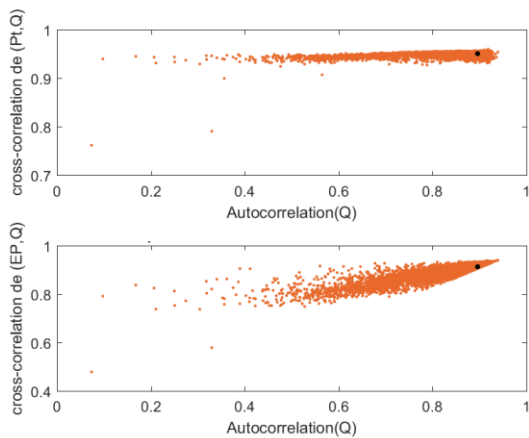
Matane



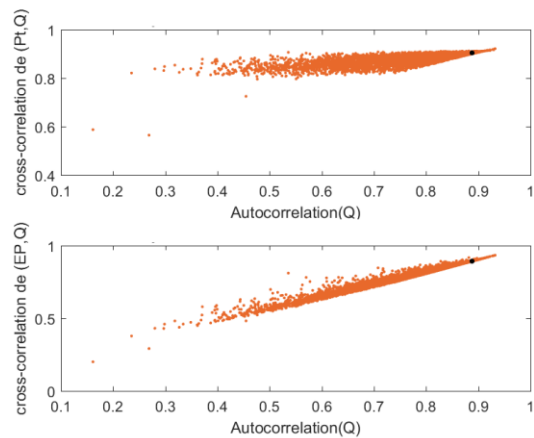
Matapedia



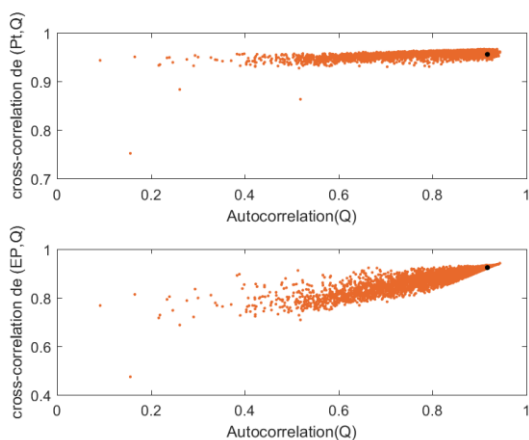
Matawin



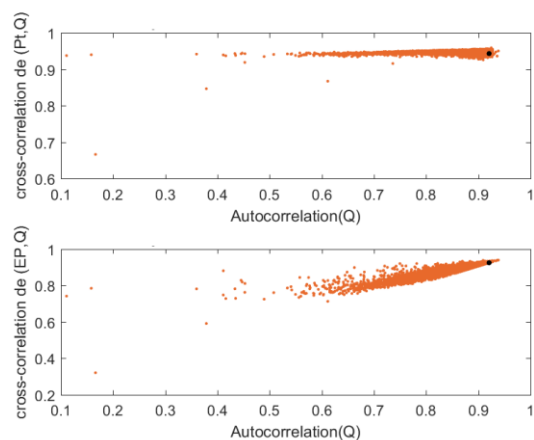
Metabetchouane



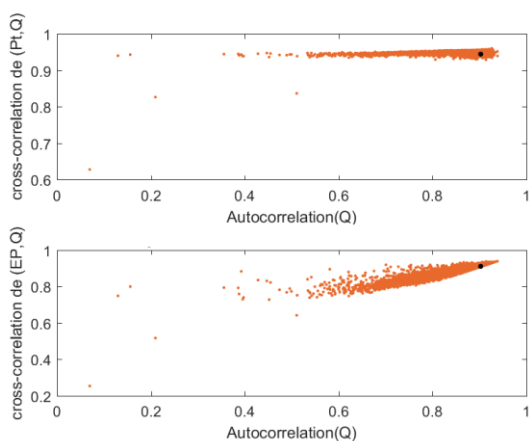
Mistassibi



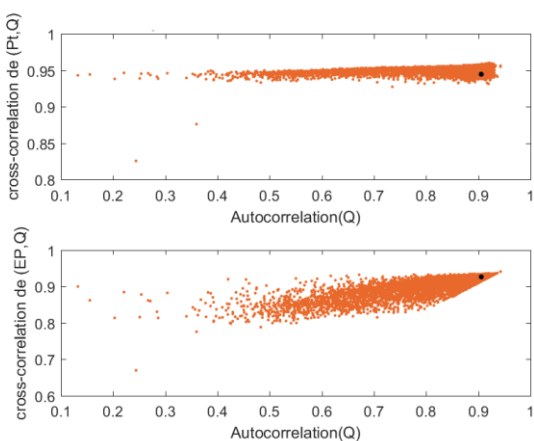
Mistassini



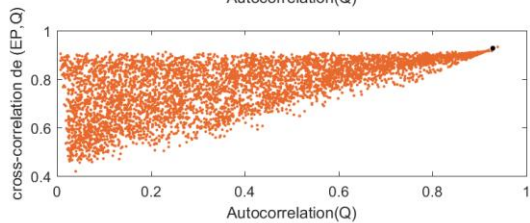
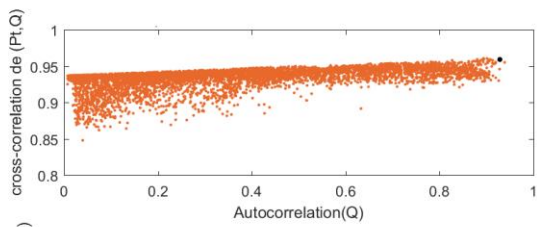
Montmorency 1



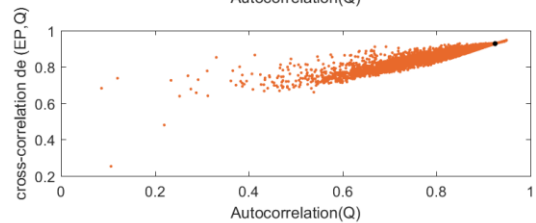
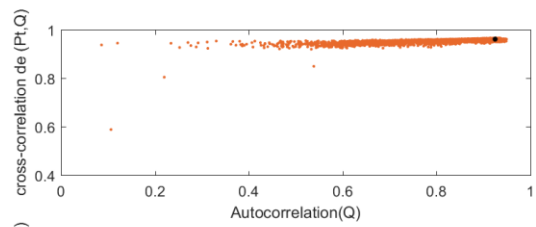
Montmorency 2



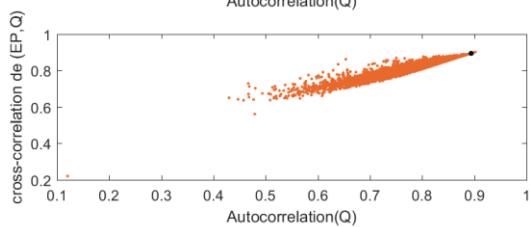
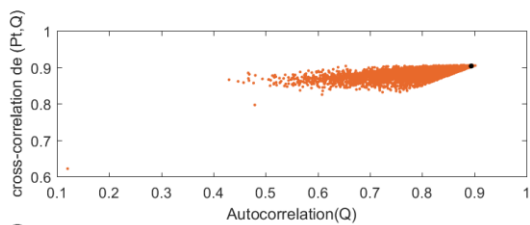
Morpions



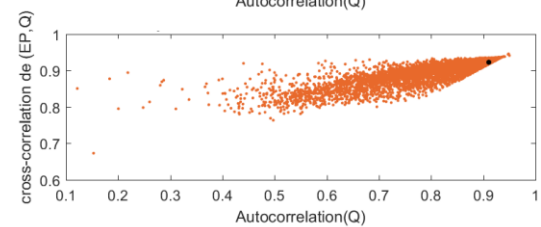
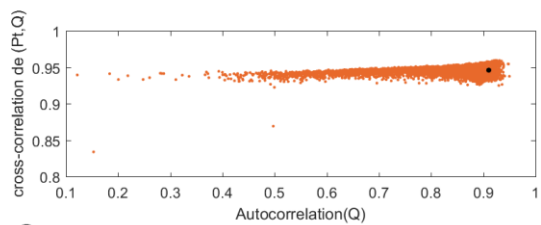
Nastapoca



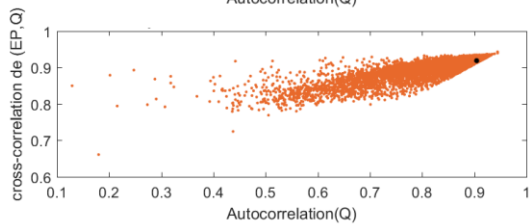
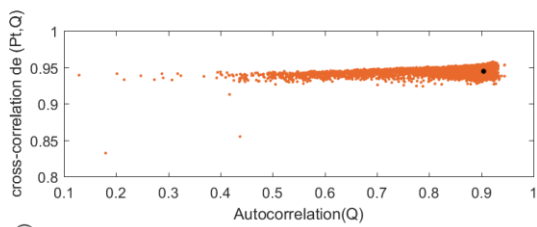
Natashquan



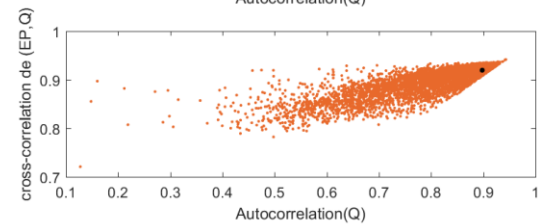
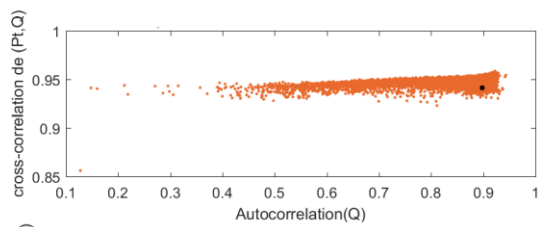
Nelson



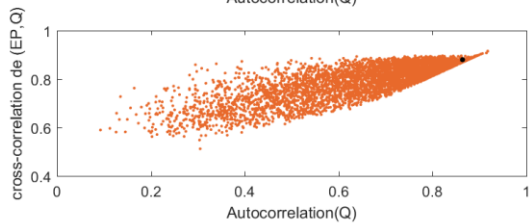
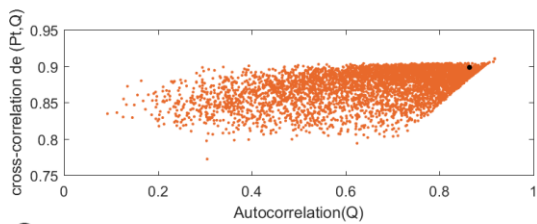
Nicolet



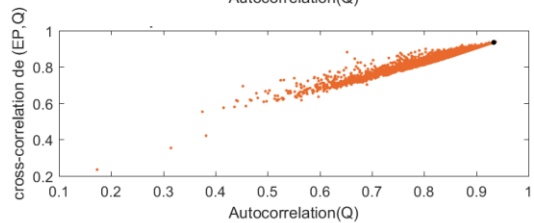
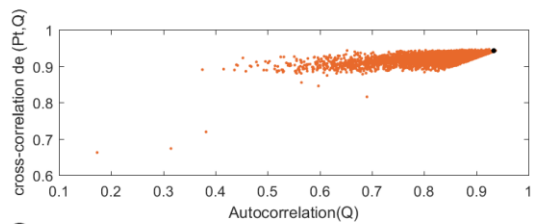
Nicolet sud-ouest



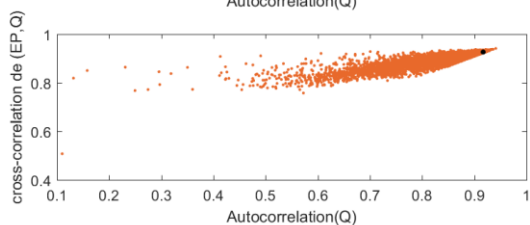
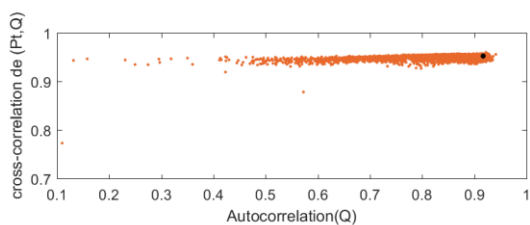
Noire 1



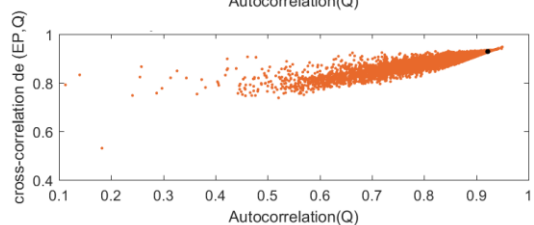
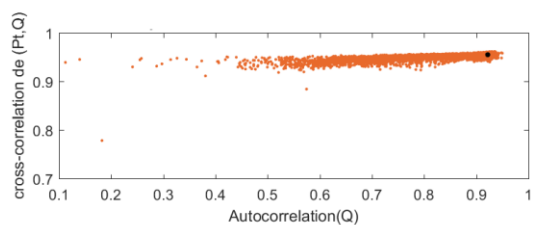
Noire 2



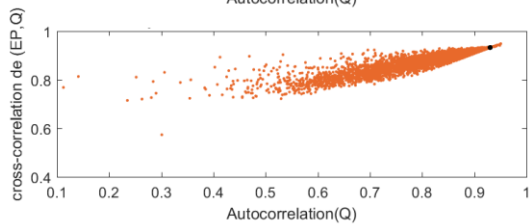
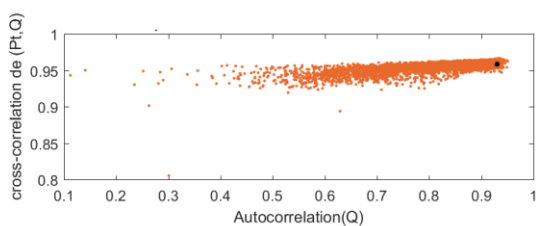
Nouvelle



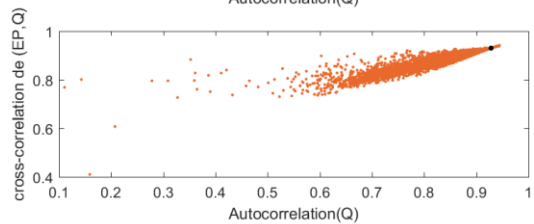
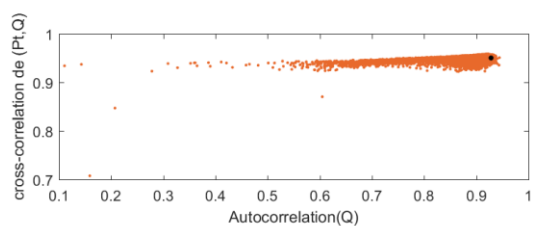
Ouareau



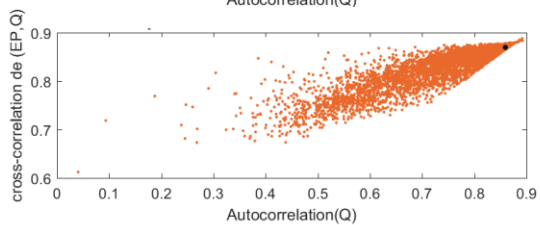
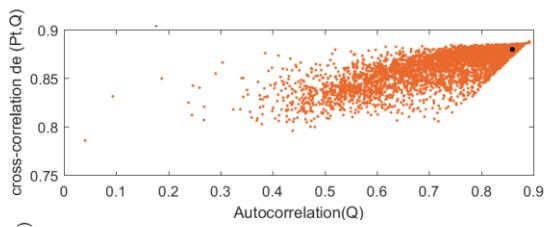
Ouelle



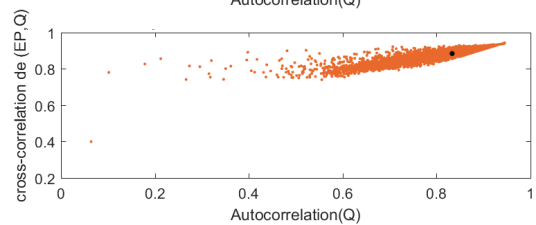
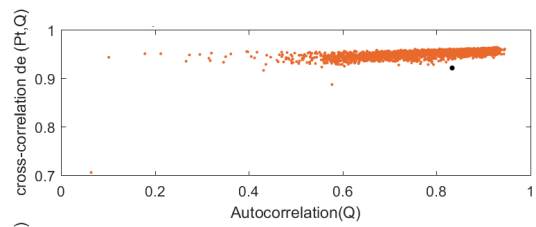
Petit Saguenay



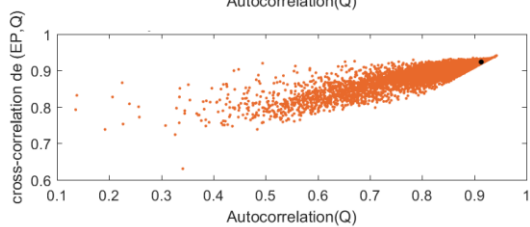
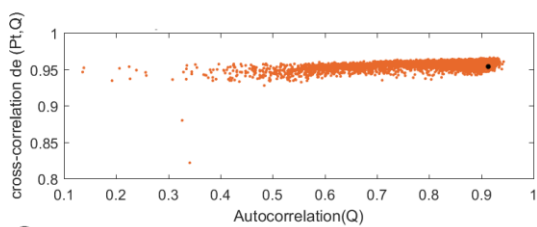
Petite Riviere Cascapedia



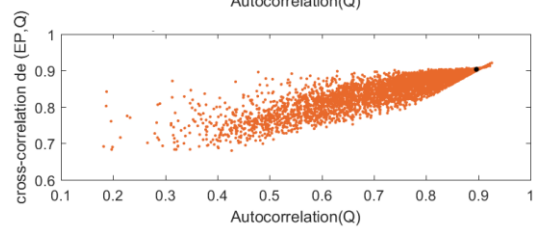
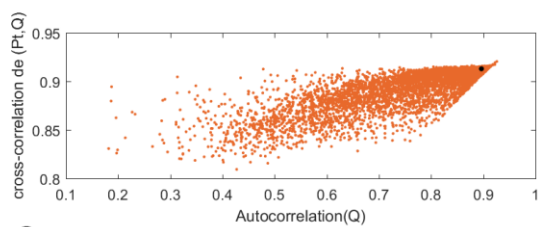
Petite Riviere Du Chene



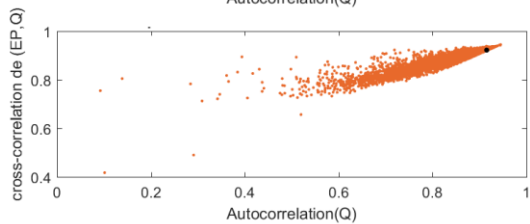
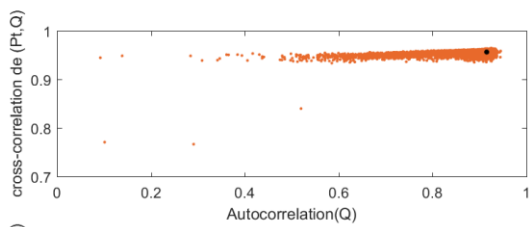
Petite Riviere Neigette



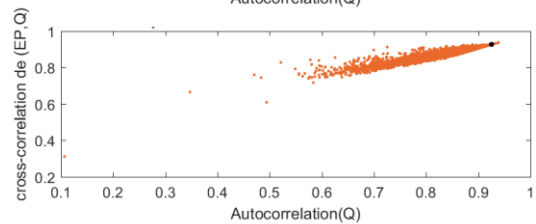
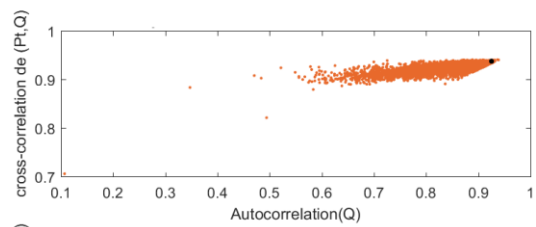
Petite Riviere Peribonka



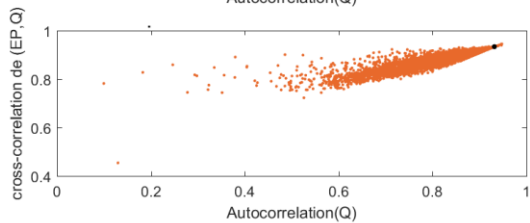
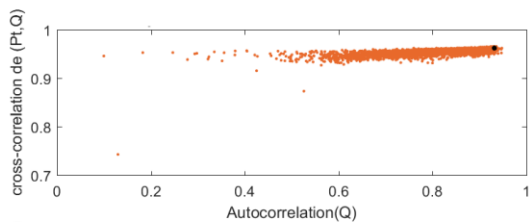
Picanoc



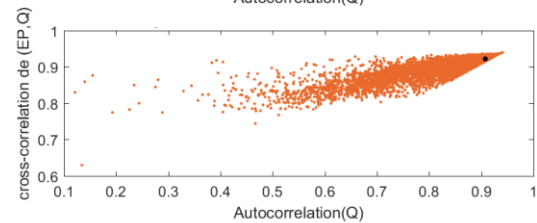
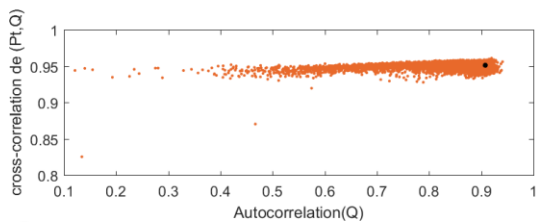
Pikauba 1



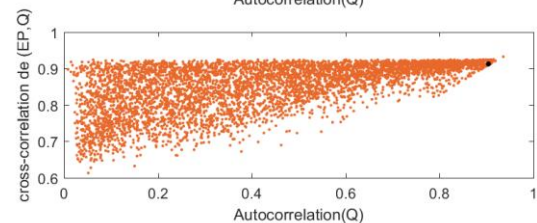
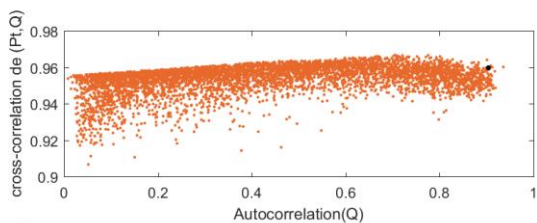
Portneuf



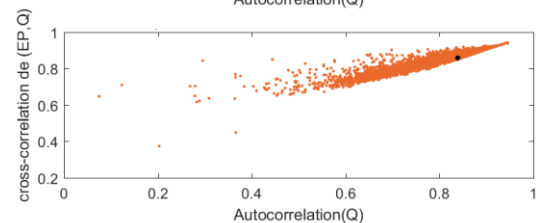
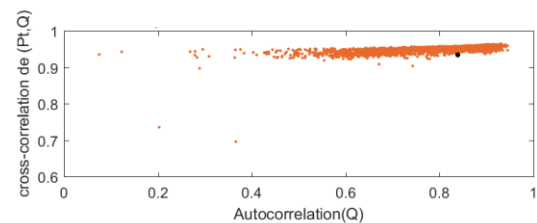
Rimouski



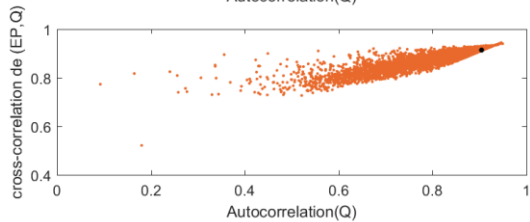
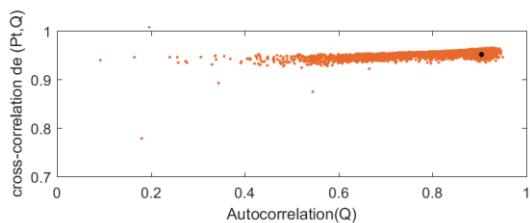
Rouge 1



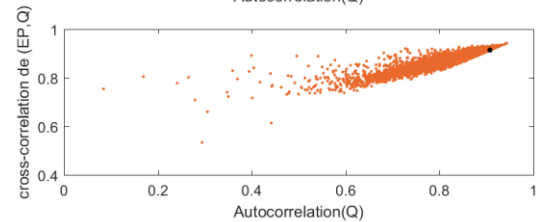
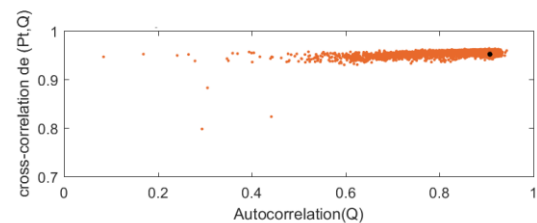
Pontax



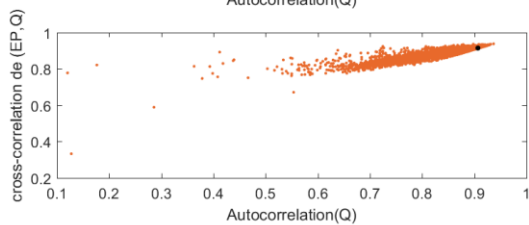
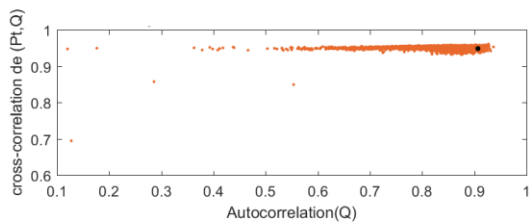
Saint Paul



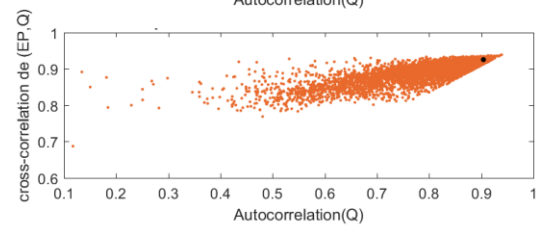
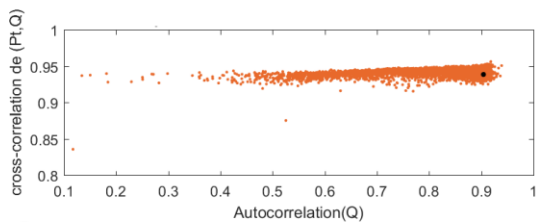
Saint louis



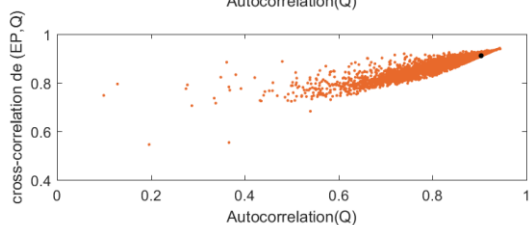
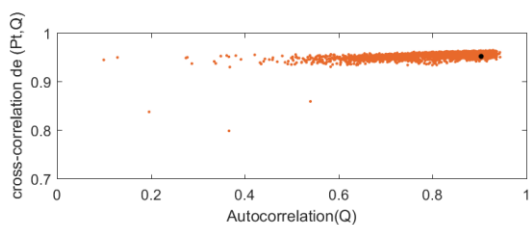
Sainte Anne 1



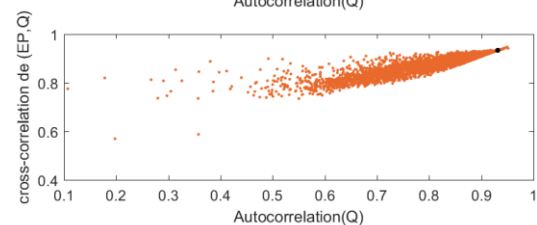
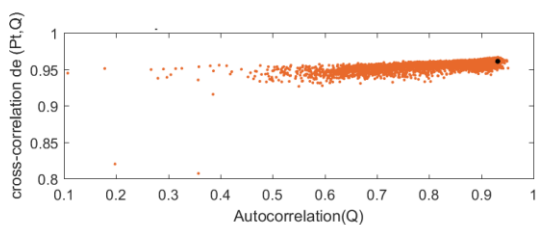
Sainte Anne 2



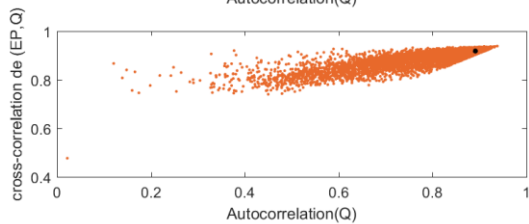
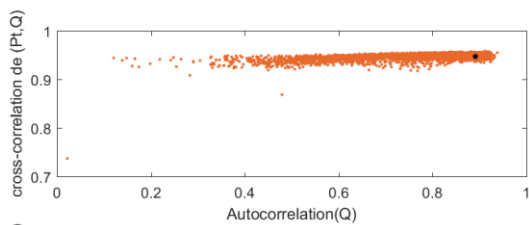
Suffolk



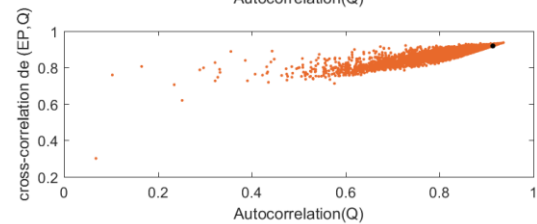
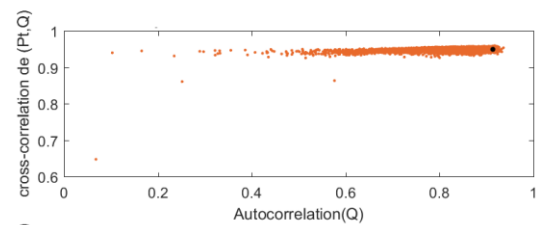
Sainte Marguerite Nord-Est



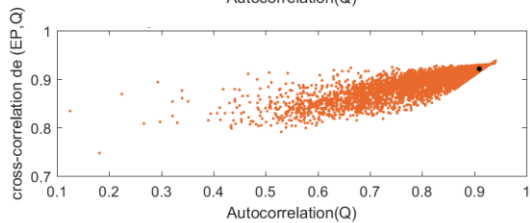
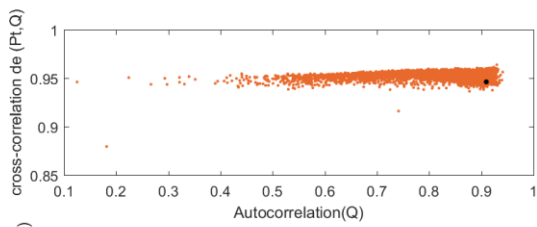
Trois pistoles



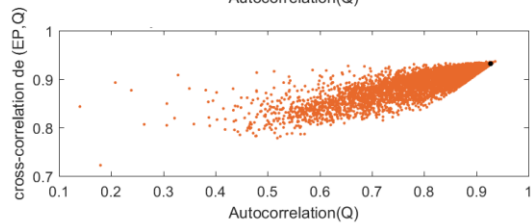
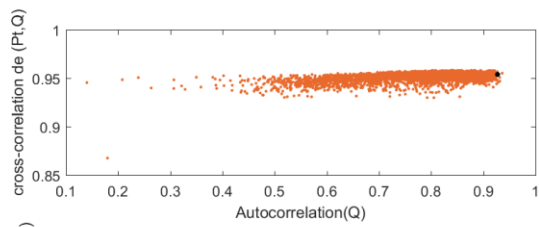
Vermillon



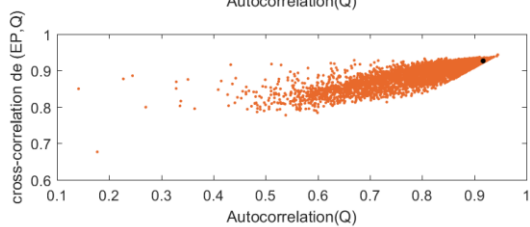
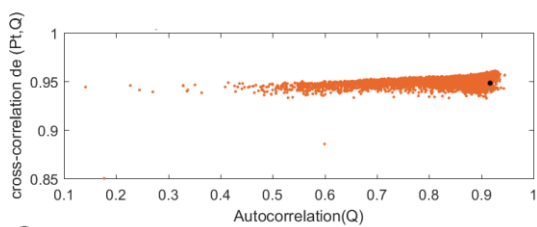
Valin



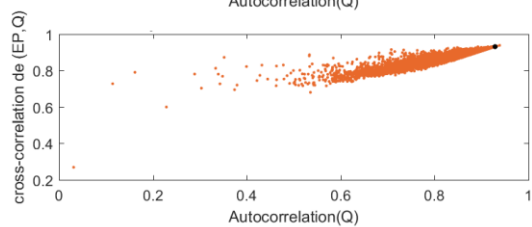
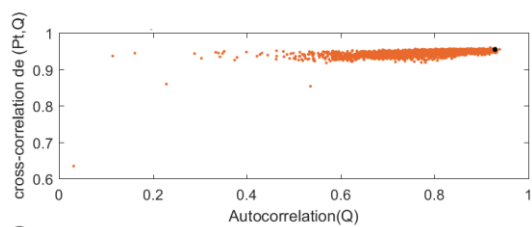
Yamaska



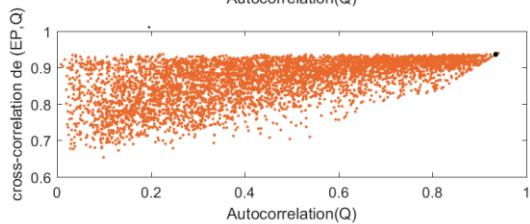
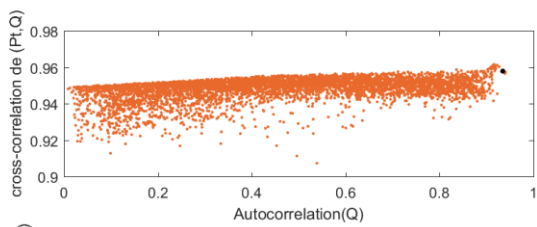
Yamaska Nord 1



Yamaska Nord 2



York



Waswanipi